

ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドライン

目次

1. はじめに.....	1
1.1. ガイドライン作成の背景と目的.....	1
1.2. 水鳥調査における UAV の有効性.....	1
2. UAV 概論.....	3
2.1. UAV の種類.....	3
2.1.1. 回転翼 UAV.....	3
2.1.2. 固定翼 UAV.....	4
2.2. UAV の飛行ルール.....	4
2.2.1. 航空法における飛行の禁止空域.....	5
2.2.2. 航空法における飛行の方法の制限.....	6
2.2.3. その他の注意すべき事項、ルール等.....	7
2.3. UAV のオペレーション.....	7
2.3.1. UAV を安全に運用するために.....	8
2.3.2. 飛行計画の策定.....	8
2.3.3. 撮影目的.....	8
2.4. 飛行の実施.....	11
3. UAV を活用した水鳥調査.....	12
3.1. 鳥の群れと離陸地の距離の目安.....	13
3.2. 水鳥のモニタリングに必要な画像の解像度.....	16
3.2.1. 高度と画像範囲・解像度との関係.....	16
3.3. マガンの撮影時におけるカメラ設定.....	22
3.3.1. 薄暗い環境下における撮影方法.....	22
3.3.2. カメラ設定の目安.....	22
3.4. 鳥の行動への影響を最小化するための飛行高度の目安.....	24
3.4.1. 水平接近実験.....	25
3.4.2. 垂直接近実験.....	28
3.5. 飛行高度目安早見表.....	31
3.6. ガンカモ類がドローンから逃避する要因.....	32
3.6.1. 騒音減衰モデルの作成.....	33
3.6.2. ドローンのローター音に対するガンカモ類の反応.....	34
3.7. 熱赤外カメラの活用可能性.....	37
4. 画像解析による自動カウント.....	38
4.1. マガンの自動カウントの概要.....	38
4.2. マガン自動カウント・ソフトウェアについて.....	39

4.3.	画像解析による自動カウントの課題と今後について	40
5.	付録	41
5.1.	ドローンの位置精度検証	41
5.2.	水平位置精度の検証.....	41
5.3.	垂直位置精度の検証.....	43
5.4.	ドローンのヒヤリハット事例.....	45

1. はじめに

1.1. ガイドライン作成の背景と目的

我が国には 50 ものラムサール条約湿地がある。それらの湿地や全国に点在する湖沼は、ガンカモ類等の渡り鳥の飛来地や貴重な生物の生息場として機能しており、生物多様性の重要なスポットである。また、水資源、防災、観光資源、環境教育などの生態系サービスを提供している貴重な自然資源でもある。一方で、干拓や護岸工事、水質汚濁、外来生物の移入に見られる人間活動の影響により、多くの湿地生態系は消滅するか、消滅を免れても劣化が進行しており、先の生物多様性の場や生態系サービスという機能が失われつつある。そうした湿地の保全・再生のためには、絶えず変化する生態系をより広い視野で精密に監視すること、その結果を順応的管理に迅速に反映させることが望ましい。しかし、生態系の監視・管理には、時間と労力という面で莫大なコストがかかることから、十分な情報が得られずに保全や再生の推進に支障をきたす場合が多い。

近年、ロボットおよび情報通信技術の進歩は目覚ましく、それらの生態系監視・管理技術への活用が注目を集めている。しかし、機器やアプリケーションの扱いが煩雑で容易に使用できず、なおかつ高価であることから実用化が遅れている。そのような障害をなくし、現場管理者や調査者と最新技術をシームレスに繋ぐためには、現地調査、機器開発、情報処理の専門家の連携によって監視・管理技術の開発を推進することが肝要である。

環境研究総合推進費事業「フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発 (1-1602)」では、保全や再生の推進とフィールド調査と最新技術をシームレスに繋ぐことを目標として、1) 低コスト化・効率化を実現するためのハス刈りロボットボートやネットワークカメラなどの生物監視・管理技術の開発、2) 安全で簡便な監視や管理を実現するためのガイドライン・マニュアル作成を行った。これらにより、全国の湿地でのモニタリングへの展開が容易になり、保全・再生活動の促進に寄与できるものと考えている。

1.2. 水鳥調査における UAV の有効性

近年急速に普及した小型無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle; UAV、ドローン) は、野生動物調査の実用的かつ安価なツールとして多く用いられるようになってきている。その利用方法は、野生動物の有視カウント、音響モニタリング、希少種の探索、ウイルスのサンプル採取など多岐に渡る。また、UAV は野生生物管理においては農業被害などをもたらす鳥類を追い払うツールとしても多く利用されるようになってきた。国内ではカワウ、カワアイサ、タンチョウの追い払いに試用されており、国外ではバードストライクの回避などにも試用されている。これらは、UAV が対象種にとって潜在的な捕食者となり、逃避という対捕食者行動を引き起こしているものであり、UAV に対する野生生物の逃避開始距離などのメカニズムを理解することで、効率的な野生動物の追い払いが可能となる。このことは、他方では UAV による野生生物への影響を最小限に抑え、効果的にモニタリングや調査を実施する

ことにつながる知見をもたらすことになる。

日本には 190 万羽あまりのガン、カモ、ハクチョウ類が飛来する。これらのガンカモ類のモニタリングは 1970 年より始まり、都道府県ごとに毎年 1 月に実施され、環境省によってとりまとめられている。また、2003 年には年複数回のカウントを行うモニタリングサイト 1000 も全国的に開始された。一方で、識別やカウント能力などスキルのある人材に依存している現在のモニタリングでは、調査者の高齢化などその人材不足が深刻化しており、効率的かつ省力的にモニタリングを継続することが求められる。UAV は対象物の直上から高解像度の画像を得ることが可能であり、画像判別による個体数計測などモニタリングの効率化や省力化が期待される。しかしながら、UAV はガンカモ類へ負の影響や予見できないリスクを与える可能性もあり、UAV がガンカモ類へ与える影響を正しく評価し、リスクを回避あるいは縮小することが求められる。

このガイドラインでは、野生動物へ負の影響やリスクを与えずに UAV を用いたモニタリングを可能とするため、水鳥、特にガンカモ類を対象に、UAV による接近実験をはじめとするさまざまな実験を行った。その結果にもとづき、鳥類、特にガンカモ類へできるだけ影響を与えずに UAV をモニタリングに活用する方法をガイドラインとしてまとめた。

2. UAV 概論

近年遠隔操作や自動操縦により飛行し写真撮影を行うことができる無人航空機 (UAV、ドローン) が安価で入手できるようになり、各種目的で利用されるようになってきている。UAV にはいくつかの種類があり、目的に応じて適したものがあり、その特性を理解しておくことが必要である。これについて、2.1 節にて紹介する。

また前章で述べたように、水鳥の調査への利用も注目されており多くの研究事例があり、さらにその利用用途の拡がりも期待される。具体的な調査の手法および留意点等については、3 章にて紹介する。

一方で UAV を利用するにあたっては遵守すべき飛行ルールがある。これについては 2.2 節で紹介する。また UAV のオペレーションについては、2.3 節にて紹介する。

2.1. UAV の種類

UAV には大きく分けてよく使われる回転翼のものと、旅客機と同じような固定翼のものと 2 種類がある。ここではそれぞれの特徴について紹介する。

2.1.1. 回転翼 UAV

近年のドローン・ブームの火付け役となったのは、複数の回転翼をもつ回転翼型 UAV で、マルチ・コプターとも呼ばれる。マルチ・コプターは複数のローター及びプロペラで構成されており、4 つのローターを持つクアッド・コプターが多いが、6 つ (ヘキサ・コプター) または 8 つ (オクト・コプター) のローターを持つマルチ・コプターもある。マルチ・コプターは飛行中に各ローターの相対速度を変化させることで生成される推力によってドローンの動きを制御する。

回転翼タイプの UAV は、垂直方向の離着陸及び空中でのホバリングが可能であり、離発着地点が狭い場合でも運用が可能という特徴を持つ。操縦装置から手を離せばホバリングするため、初心者でも扱いやすい。

マルチコプターに代表される回転翼 UAV のメリットは以下のような点が挙げられる。

- ・優れた操作性
- ・低価格
- ・コンパクトさ
- ・使いやすさ
- ・高い積載能力



図 2-1-1 回転翼 UAV の一例。DJI 社 Inspire2、同社 Website より

10 万円程度の比較的 low 価格の UAV でも標準搭載されたカメラを使用し、撮影を行うことが可能である。

2.1.2. 固定翼 UAV

固定翼機とは、主翼が機体に対して固定されており、機体が前進することによって揚力を発生させ飛行する航空機のことを指す。通常の旅客機と同じ原理である。固定翼タイプの UAV は通常、主翼と 1 つのプロペラを持つ。飛行中は、主翼によって揚力を発生させることで、UAV は空中に留まることができる。

固定翼 UAV は通常、離着陸、特に着陸用に数十 m 四方の整地された平坦地と、これに続く 100~300m の離陸上昇及び着陸降下のための障害物のない直線的な経路が必要となる。100~200m の旋回半径を必要とするため、山間地では地表とのクリアランスの確保が難しくなる。巡航速度は、50~90km/h、実用上の飛行時間は 50 分程度、飛行距離は 50km 程度であることが多い。一般的に回転翼機よりも長時間の飛行が可能である。

固定翼 UAV のメリットは以下のような点が挙げられる。

- ・より長い飛行時間/飛行範囲
- ・より高い安定性
- ・着地の安全性

比較的狭い領域のマッピング・調査には運用が容易な回転翼が適している。現状では、固定翼 UAV は高価格であったり、製品の選択肢が少ない現状にある。また、調査対象とする鳥類に対し、固定翼 UAV のほうがより影響が大きいという研究事例もある。

一方で生息域のマッピング、調査等で広域の撮影が必要となる場合、固定翼が適している場合もあり、それぞれの用途の応じて適切な機体を選択する必要がある。



図 1-1-2 固定翼ドローンの一例。
senseFly 社 eBee、同社 Website より

2.2. UAV の飛行ルール

UAV の飛行により人が乗っている航空機の安全が損なわれたり、地上の人や建物・車両に危害が及ぶことがないよう航空法等により UAV の飛行ルールが定められている。

国土交通省航空局の平成 30 年 3 月 27 日発行「無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン¹」によると、航空法における無人航空機とは「人が乗ることができない飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船であって、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの」と定義されており、いわゆるドローン（マルチコプター）、ラジコン機、農薬散布用ヘリコプター等が該当する。ただし、マルチコプターやラジコン機等であっても、重量（機体本体の重量とバッテリーの重量の合計）200 グラム未満のものは、無人航空機ではなく「模型航空機」に分類される、とのことである。

¹ <http://www.mlit.go.jp/common/001228024.pdf> (2018/3/27)

2.2.1. 航空法における飛行の禁止空域

国土交通省よりホームページにて紹介されているように、有人の航空機に衝突するおそれや、落下した場合に地上の人などに危害を及ぼすおそれが高い空域として、以下の空域で無人航空機を飛行させることは、原則として禁止されている。

図 2-2-1 に示されるこれらの空域で無人航空機を飛行させようとする場合には、安全面の措置をした上で、国土交通大臣の許可を受ける必要がある。

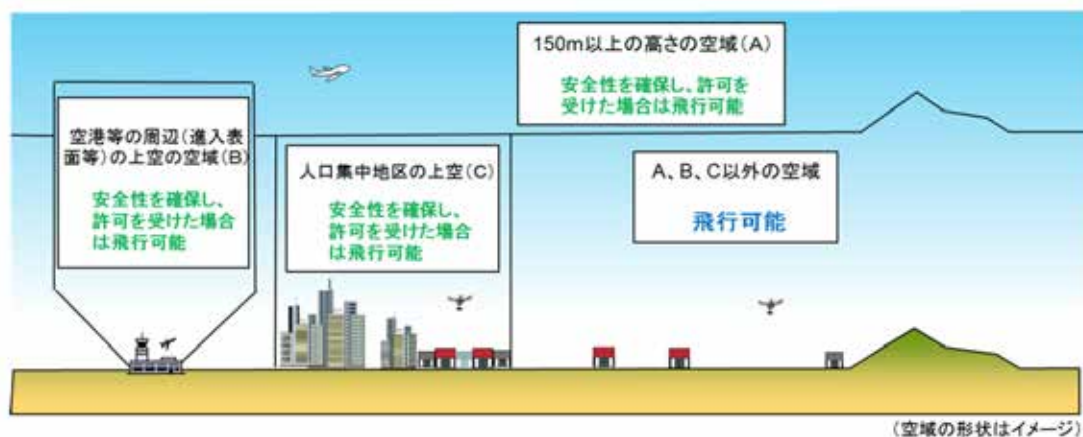


図 2-2-1 無人飛行機の飛行禁止空域 国土交通省航空局「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」より

人口集中地区に該当するのは、図 2-2-2 の赤で示される領域である。実際に飛行させる場合には飛行予定領域に該当するかどうか詳細な地図で調べることが必要であるが、国土地理院の地理院地図 (<http://maps.gsi.go.jp>) などで調べることができる。

詳しいことは、国土交通省航空局のホームページで確認したり、問い合わせをする必要がある。

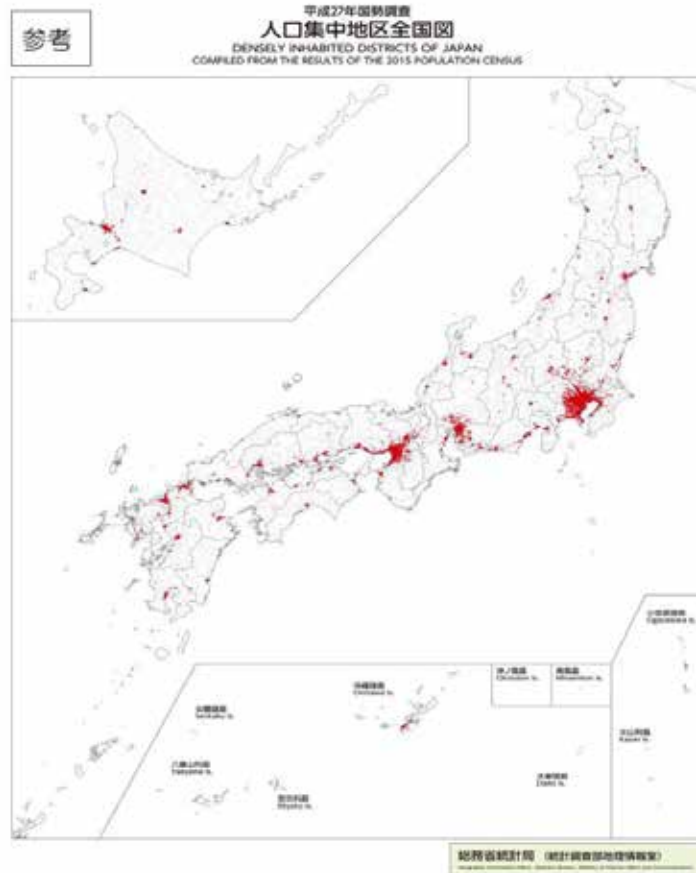


図 2-2-2 人口集中地区全国図 国土交通省航空局「無人航空機(ドローン、ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドライン」より

2.2.2. 航空法における飛行の方法の制限

飛行させる場所に関わらず、無人航空機を飛行させる場合には、以下のルールを守ることが必要である（「無人航空機(ドローン、ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドライン」より、図 2-2-3）。

- ・ 日中（日出から日没まで）に飛行させること
- ・ 目視（直接肉眼による）範囲内で無人航空機との周囲を常時監視して飛行させること（目視外飛行の例：FPV²、モニター監視）
- ・ 第三者又は第三者の建物、第三者の車両などの物件との間に距離（30m）を保って飛行させること
- ・ 祭礼、縁日など多数の人が集まる催し場所の上空で飛行させないこと
- ・ 爆発物など危険物を輸送しないこと

² First Person's View

- ・ 無人航空機から物を投下しないこと

これらルールによらずに無人航空機を飛行させようとする場合には、安全面の措置をした上で、国土交通大臣の承認を受ける必要がある。

水鳥の調査では、例えば日の出前あるいは日の入り後に飛行させたい場合がありえるが、その場合は飛行許可を得たうえで、飛行させる必要がある。飛行の申請はインターネット経由³で行うことも可能である。

＜承認が必要となる飛行の方法＞



図 2-2-3 承認が必要となる飛行の方法 国土交通省航空局「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」より

2.2.3. その他の注意すべき事項、ルール等

前述の航空法による制限の他に UAV を飛ばす場合には、飛行領域となる土地の管理者の許可を得る必要がある。統一して定められた申請の方法等がある訳ではないが、河川や国有林など国や自治体が管理する土地においては様式等が整備されているところも多くなっているが、個別に確認を行う必要がある。

また、以後紹介するような安全に運行するための取り組みは十分に行う必要があるが、それでも事故は発生する可能性をゼロにはできない。事故が発生した場合の対応について、関係者と十分に協議しておくとともに、事故発生時に適用が可能な損害賠償保険があるか確認し（所属する組織が加入している業務保険でカバーされる場合もある）、必要に応じて加入をするなどの準備も必須と考える。レンタルした機材を使用するときも保険の加入や事故時の対応について十分な確認が必要である。

2.3. UAV のオペレーション

本節では、UAV を安全にかつ有用に活用するためのオペレーション方法について説明する。

³ 国土交通省 DIPS <https://www.dips.mlit.go.jp/>

2.3.1. UAV を安全に運用するために

UAV を安全に運用するためには、UAV に使用されている計器、センサ、バッテリーなどの特性をよく理解するところから始まる。また、使用する UAV の機器固有の理解、操作方法を十分に理解してから飛行させることが大事である。マニュアルを熟読するとともに、電源の投入から、バッテリーやカメラの状態の確認、各種の設定方法などを、野外に出る前に屋内で十分に把握し、できれば屋内の安全な場所で何度か飛行させ、その後に屋内でもテストしたあとで、本格的な調査に用いるなど、十分な準備が必要である。UAV に対する習熟、機体に対する習熟は不足の事態に対応するために必須の要件であり、操作に余裕を持つことが危機を招かないために必要なことでもある。

その他、安全運行のために必要な準備、点検、安全文化の要請、天候の確認、周囲の安全確認、等については「必携ドローン活用ガイドー安全かつ効率的な活用を目指して（内山庄一郎編著）」「ドローンを用いたほ場計測マニュアル（農研機構 農業環境変動研究センター）」などの書籍、資料を参考にされたい。

2.3.2. 飛行計画の策定

飛行計画の立案にあたっては、主に以下の要素を基に行う。

- ・ 撮影目的
- ・ 飛行の日時
- ・ 撮影対象領域
- ・ 飛行チームの体制
- ・ 撮影に利用する機材（UAV、カメラ、ドローン）
- ・ 飛行高度
- ・ 飛行ルート・飛行所要時間
- ・ 撮影方法

上記項目について順に説明する。

2.3.3. 撮影目的

UAV を飛行して撮影を行う目的を明確にすることが必要である。水鳥のカウントを行うのか、水鳥の生息環境調査、植生の分布の把握が目的か、あるいは水鳥の種の違いを細かく見分ける必要があるか、さらには撮影後にどのような解析を目視あるいは自動で行うか、これらを明確にしたうえで具体的な撮影計画の策定を行う。

ときとして、撮影を企画する人、アイデアを出す人と撮影を担当する人が別であって、そのような場合撮影を担当する人が撮影計画の策定を行う場合が多いと思われる。撮影の企画、意図、目的が撮影を行う人に十分に伝わっていないと、撮影した結果の画像が目的を満

たさないことが有りうる。

1) 飛行の日時

目的に応じて適した撮影の日時が異なる。罅入りしたマガンを撮影するには、マガンの罅入りが完了した日没後の時間帯あるいは罅立ち前の早朝に撮影を行う必要がある（ただし、その場合は国土交通省への申請が必要となる）。それ以外の植生分布を把握するための撮影であれば、照度が十分にある昼間の時間帯に行ったほうがよい。

2) 撮影対象領域

関心のある領域は撮影目的から決定されると思われるが、具体的な飛行ルート等を決定すると、すべての領域を撮影するには時間がかかりすぎる可能性もあるので、優先順位を考慮しておくことは有効である。

まだ前述 2.2.1 飛行禁止空域や 2.2.2 飛行方法のどちらかあるいは両方にかかる場合は、日時や領域を見直すか、国土交通省への申請を行って許可を得るか、どちらかが必要となる。

3) 撮影に利用する機材（UAV、カメラ、ドローン）

通常は所持する UAV のなかから選択することになると思われる。照度が十分でないマガンカウントの場合であれば、できるだけ大きな CMOS⁴を用いた明るい画像を得ることができカメラを使うことが重要である。また f 値の大きなレンズを使うことも重要である。

4) 飛行チームの体制

UAV の操作は十分な訓練をした者が行うのはもちろんであるが、それを補助する者の役割も重要である。人数的にも余裕をもった体制で実施することが事故のリスクを低減することになる。最低でも 2 名以上で実施することを強く推奨する。

5) 飛行高度・オーバーラップ

撮影目的から考え、必要な対象物の情報が得られる高度で撮影できるよう、飛行高度を仮に決定する。

また、オーバーラップは計画上の写真同士の重なるの割合である。例えば、水面上のマガンのカウントなど対象領域が平面の場合は、最小限（例えば 10%）でもよい。植生のマッピングのように 3 次元モデルを作成する必要があったり、正確な写真同士の接合を行う必要がある場合は、60～70%以上のオーバーラップが必要とされる。

⁴ complementary metal-oxide semiconductor（相補型金属酸化膜半導体）の略。LSI（大規模集積回路）の構造の種類のひとつで、消費電力が少ない、製造コストが安いなどの利点から、最近デジタルカメラでは CMOS を使用した撮像素子が多く用いられる。

6) 飛行ルート・飛行所要時間

使用する UAV、カメラ、レンズ、飛行高度、オーバーラップを決定すると、多くの DJI 社ドローン向けの GS Pro や ArduPilot 向けの Mission Planner などの UAV 飛行ソフトウェアでは自動的に飛行ルートを計算し、飛行所要時間も算出してくれる。領域が大きいときはバッテリーを交換しつつ、複数回の飛行が必要となる場合もある。ドローンの仕様上の飛行可能時間の半分程度までの時間を目安に計画を立てるようにするのが安全のためによいと考える。

飛行範囲は目視が可能な距離か、調査に掛けられる時間、手持ちのバッテリーの数などを考え、必要に応じて飛行領域、飛行高度などを見直す。図 2-3-1 に作成した飛行計画の一例を示す。北海道宮島沼のマガンのカウントを目的とした撮影の例である。飛行予想時間は、7 分 39 秒と見積もられている。飛行高度やオーバーラップなどは自由に設定することができる。



図 2-3-1 DJI GS Pro により作成した北海道宮島沼を対象とした飛行計画の例

7) 撮影方法

照度が十分であれば、露出時間（シャッター速度）を 1/1000 あるいは 1/2000 程度に短くすることが可能で、ブレが起きる可能性が少なくなり、ホバリングさせずに移動しながらの撮影が可能である。一方で日没後の撮影の場合など露出時間が長くなる場合はホバリングが必要である。

また、撮影角度は直下方向を撮影するのが一般的であるが、必要に応じて角度をつけることにより対象物の特徴をより良く捉えることができる場合もある。

8) 飛行計画策定に関するまとめ

以上を要約し、通常の撮影と照度が十分でない場合の撮影の2つのケースで比較すると以下のようにまとめられる。

表 2-3-1 通常の撮影と低照度時の飛行計画の策定について

	通常の撮影 (例：水鳥生息環境の植生マッピングなど)	低照度時 (例：罫入り後のマガン等のカウンント)
飛行の日時 撮影に適した時刻	昼間、照度が十分なとき	罫入り後（日没後）あるいは罫立ち前（日の出前）
飛行の申請	土地管理者、その他関係者の許可を得る	左記に加え、国土交通省への夜間飛行申請を行い許可を得ることが必要
撮影に利用する機材 (UAV、カメラ、ドローン)	生息環境の植生分布の概要を掴むためであれば、DJI 社 Phantom4 や Mavic でも十分可能。	できるだけ明るい画像が取得できる機材。 例：DJI 社 Inspire2 と Zenmuse X5S カメラの組み合わせ。レンズは 17 mm , f1.8 のものなど
飛行高度・オーバーラップ	撮影の目的に応じて典型的には 50～140 m 程度	撮影範囲を最大化するために 140 m 程度
飛行ルート・飛行所要時間	オーバーラップを 60～70 %程度確保。必要に応じて領域を分割して複数回飛行	短時間でできるだけ広域の撮影を行うため、オーバーラップは最小限で 10 %程度
撮影方法	露出時間を 1/1000 あるいは 1/2000 程度とし、移動しながらの撮影	撮影毎にホバリングが必要

2.4. 飛行の実施

飛行にあたって注意すべき事項として以下が挙げられる。

- 周辺の安全を十分に配慮する。UAV 操縦者の他に周囲から近づく人がいるか監視を担当する人を置くようにする。
- 機体の挙動、バッテリーの残量の変化を常時監視する。機器の異常に気づくために必要なことである。
- その他、天候（降雨など）、風速の変化、GNSS 受信状況、操縦用電場状況、等にも気を配る。
- 機器の異常に気づいた場合は速やかに帰還、あるいは着陸させる。

3. UAV を活用した水鳥調査

高解像度の空中写真が容易に得られるドローンは、鳥類調査の有効なツールになりえる。中でもガンカモ類は、比較的大型な種が多いことや、水面や田畑といった開けた環境にいること、比較的動きが緩慢であることなどから、鳥類の中ではドローンを用いた調査に向いている。また、ガンカモ類はしばしば数百羽から数千羽の、時には数万羽の大群になる。このような群れを湖岸や河岸から低い視点で遠望した場合、前後の個体が重なって記録しにくいことがある。マガンについては、ねぐらから飛び出すまたはねぐらに戻ってくる群れを記録する従来の目視調査では、次々と飛来する大小多数の群れを迅速に記録せねばならず、多少誤差が生じていた。こうした場面において、高空から俯瞰したドローンの画像ならば、正確かつ省力的に記録できる可能性がある。以上の適性や必要性の点から、本章ではドローンを運用する主な対象としてガンカモ類を想定した。調査は2016/17～2018/19年の3越冬期において宮城県北部の伊豆沼・内沼や北海道の宮島沼などガンカモ類の大規模飛来地でおこなった。

ガンカモ類等の水鳥の調査でドローンを適切に運用するためには、様々な技術的知見が必要である。本章では、ドローンを運用するにあたり、群れからどのくらいの距離をとって飛ばせばよいのか、どのくらいの画像解像度を確保すればよいのか、どのくらいの高度で飛ばせばよいのか、どの時間帯に飛ばせばよいのかといった画像の取得方法に関する指針を前半部で提示する。後半部では、ドローンで得られた画像の処理方法を述べる。

3.1. 鳥の群れと離陸地の距離の目安

ガンカモ類等の水鳥の調査でドローンを用いる目的は、主に個体数や種構成、空間分布の把握であろう。そのような調査では一般に、離陸地の直上で機体を垂直に上昇させ、それから対象とする群れの上空まで水平に移動させる。その際、ガンカモ類は上空を飛行する機体だけでなく、垂直上昇中の機体に反応して逃避することがあり、近距離であるほどそのリスクは大きい。したがって攪乱回避の点では、できるだけ群れの遠くから離陸させたほうがよい。しかしながら、必要以上に遠距離から離陸させれば、バッテリーを余分に消費し、撮影を行う空域での滞空時間が短くなる可能性があるほか、遠方のため群れの位置や行動の把握が困難になる可能性もある。そのため、ドローンを離陸させる際は適切な群れとの距離を選択する必要がある。



【摘要】ドローンを離陸させる時の鳥との距離の目安

- マガンの調査では、水面にいる群れを対象とする場合は、理想的には **200m** 以上の距離をとって離陸させることが望ましい。一方、陸上にいる群れを対象とする場合は、理想的には **400m** 以上の距離をとって離陸させることが望ましい。水面・陸上ともに、最低でも **100m** 以上の距離を確保すべきである。
 - カモ類の調査では、**100m** 以上の距離をとって離陸させることが望ましい。
 - ハクチョウ類の調査では、**150m** 以上の距離をとって離陸させることが望ましい。
- *実際の調査時には、現地のガンカモ類の状況を考慮して適切な距離を選択する。

● 離陸地の遠近に対するガンカモ類の反応調査

ドローンを離陸させる時の鳥との距離の目安を得るための実験を行った。ガンカモ類の群れまでの距離を変えてドローンを離陸地の直上 **100m** まで上昇させた時の群れの反応を記録した。そして、機体が高度 **100m** に到達するまで群れがその場に留まった事例と、上昇中に群れが機体に反応して逃避した事例に分けて、群れまでの距離を比較した(図 3-1-1)。機体は、国内シェアの高い小型クアッドコプターである DJI 社 Phantom4 を使用した。群れの反応は、歩行または遊泳によって遠ざかる、飛び去るといった行動が認められた場合は「逃避」と判定し、無反応、首をもたげる、機体を注視するといった機体を気にしないか気になっている様子であっても静止していた場合は「停留」と判定した。

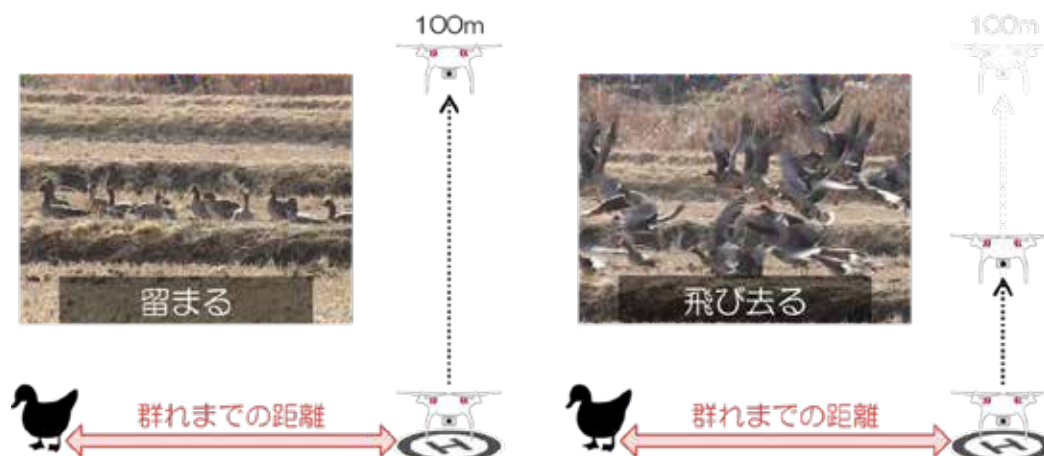


図 3-1-1 離陸地の遠近に対するガンカモ類の反応調査

マガンは、群れから 15～1,054m の距離で実験した結果、15～350m で離陸させた時に逃避が認められ、106～1,054m で離陸させた時に停留した (図 3-1-2)。さらに詳しく見ると、逃避が認められた離陸地距離は、水面にいる群れでは 15～179m であったのに対し、陸上にいる群れでは 59～350m であり、環境によって群れの反応に違いがみられた (図 3-1-3)。一方、停留した離陸地距離は、水面にいる群れでは 106～757m であり、陸上にいる群れでは 125～1,054m であった。以上の結果から、水面にいる群れを対象とする場合は 200m 以上の距離を、陸上にいる群れを対象とする場合は 400m 以上の距離をとって離陸させることが望ましいと考えられる。最低でも 100m 以上の距離を確保すべきである。(距離の目安は、少し余裕をもたせ、かつ切りのいい数値で示した。以下同じ。)

カモ類は、65～593m の水平距離で実験した。その結果、逃避は一度も認められず、全て停留した。したがって、100m 以上の距離をとれば群れを攪乱することなく離陸できるものと考えられる。

ハクチョウ類は、10～1,409m の距離で実験した結果、10～90m で離陸させた時に逃避が認められ、114～1,409m で離陸させた時に停留した。したがって、150m 以上の距離をとれば群れを攪乱することなく離陸できるものと考えられる。

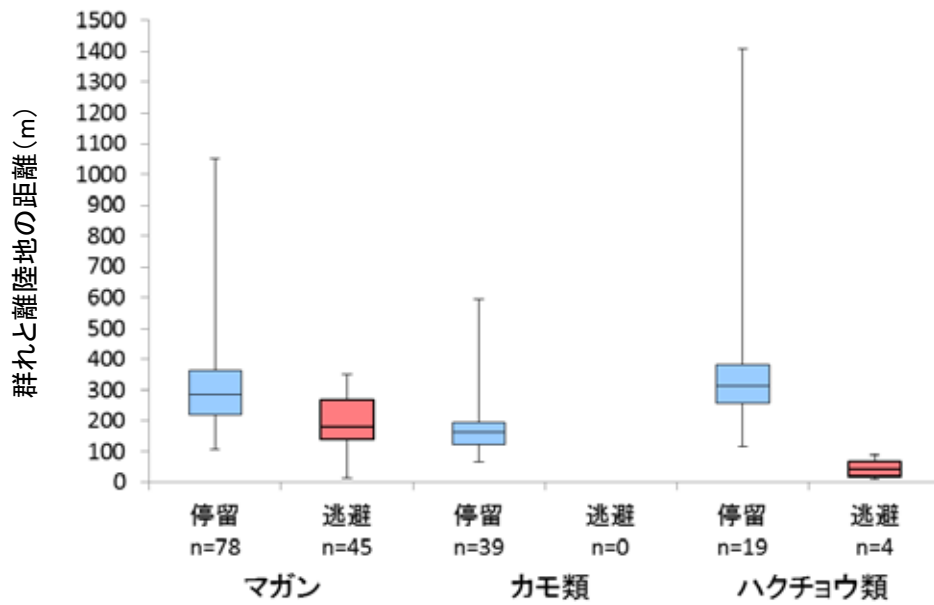


図 3-1-2 離陸地距離とガンカモ類の反応の関係

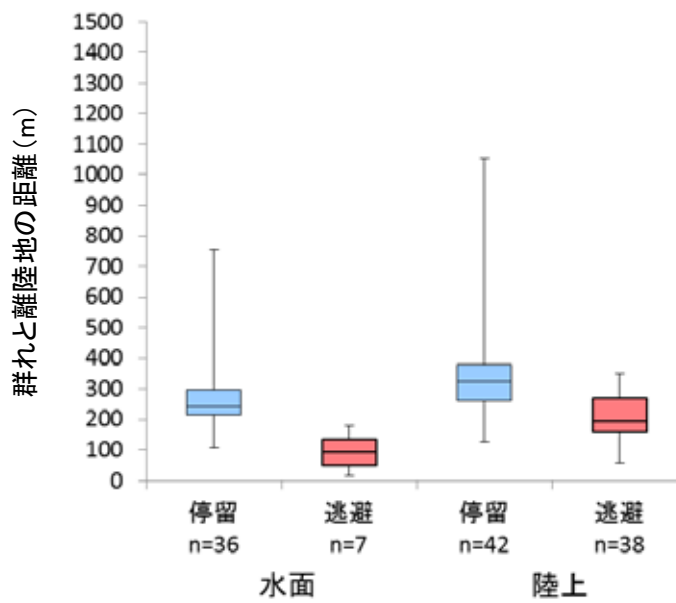


図 3-1-3 離陸地距離とガンカモ類の反応の関係 (マガン、環境別)

3.2. 水鳥のモニタリングに必要な画像の解像度

3.2.1. 高度と画像範囲・解像度との関係

一般的にドローンを高い高度から撮影した場合、撮影できる範囲（以下、本節では画像範囲と記載）は広くなり、撮影した画像の解像度（以下、本節では画像範囲と記載し、1ピクセルあたりの画像サイズ：単位 **cm/pixel** で表現）は粗くなる。低い高度から撮影した場合は、細かい解像度の画像が取得できるが、画像範囲は狭くなる（図 3-2-1）。

- ✓ 解像度とは一般的には画像を表現する画素の密度であり、高い解像度の画像はより詳細（鮮明）な画像であることを示している。しかし、本節では解像度の単位を **cm/pixel** で表現しており、この値が高いことは一般的には低い解像度の画像を示す。そのため、解像度の表現で混同することを避けるために、本節では解像度の記載には高低を用いずに「粗い」、「細かい」で表現している。

また、現状ドローンが飛行できる時間は約 20～30 分と限定されている。そのため、細かい解像度の画像を取得できる高度で撮影した場合、画像範囲が狭くなるため 1 回のフライトでは対象とした地域全域を撮影することができなく、複数回のフライトが必要になる場合もある。このように、ドローンで撮影する高度に応じて、画像範囲と解像度は“トレードオフの関係”にあり、必要とする画像の範囲や解像度を明確にし、効率的なフライトプランを作成する必要がある。

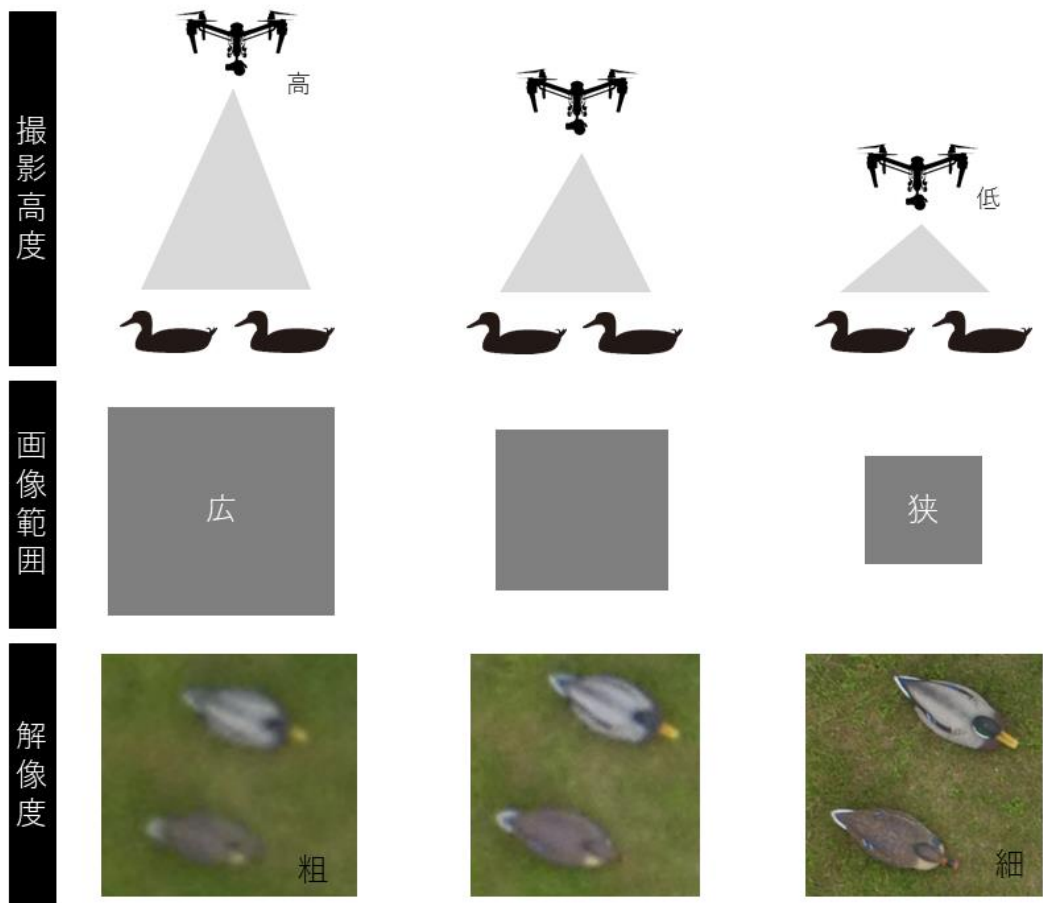


図 3-2-1 撮影する高度と画像範囲・解像度との関係

参考：アプリを使用した解像度の確認方法

DJI 社製のドローンを使用している場合、iPad アプリである DJI GS PRO を用いて、撮影高度における解像度を確認することができる。DJI GS PRO を起動し、ミッションリストから+ボタンを押し、新規ミッションを作成する。フォトマップ、もしくは計測撮影領域モードを選択し、地図上から適当な場所を選択し、ミッションを作成する。ミッションから使用しているドローンの機種（カメラモデル）を選択し、飛行高度を入力すると、解像度を確認することができる。



新規ミッション画面



カメラモデル・飛行高度を設定し、解像度を確認

3.2.2 水鳥の検知・識別に必要な解像度

現在日本で行われている水鳥のモニタリングは主に種のインベントリや種組成の把握、マガンやハクチョウ類といった渡り鳥の飛来数の把握を目的として実施されている。そのため、ドローンを水鳥のモニタリングに利用する際には、まず対象とする種を“検知”・“識別”するために必要な画像の解像度を把握し、ドローンの利用可能性も含めたフライトプランの検討が必要である。

- ✓ 本節では、鳥の姿を判別できることを検知 (detection) とし、種を判別できることを識別 (identification) と表現し (下写真を参照)、マガンやハクチョウ類といった渡り鳥の飛来数の把握には鳥を“検知”、種のインベントリや種組成の把握には種を“識別”できる画像が必要となる。



目視による種の判別の例

(左) 検知・識別可能 (中) 検知のみ可能 (右) 検知・識別不可能

大きさの異なるガンカモ類のデコイや剥製 (図 3-2-2) について、異なる高度でドローンから撮影し、目視で検知、識別できる画像の解像度を把握した結果を参考として図 3-2-3 に示した。比較的大型の水鳥 (マガン) では、検知に約 1.7cm/pixel、識別に約 0.9cm/pixel の解像度が必要であると推定された。中型のカモ類 (マガモ・コガモ) では、検知に約 0.9~1.2cm/pixel、識別に約 0.7~0.8cm/pixel の解像度、小型のカモ類 (カイツブリ幼鳥) では、検知に約 0.7cm/pixel、識別に約 0.5cm/pixel の解像度が必要であると推定された。

なお、この値は目視による判別の有無から推定した値であり、鳥の模様など身体的な特徴や撮影条件 (背景や天気など) により検知・識別に必要な解像度は多少変わることやデコイは実際より多少大きめに作成されていること、測定している体サイズは体長でないことを考慮した上で参照とすることが望ましい。

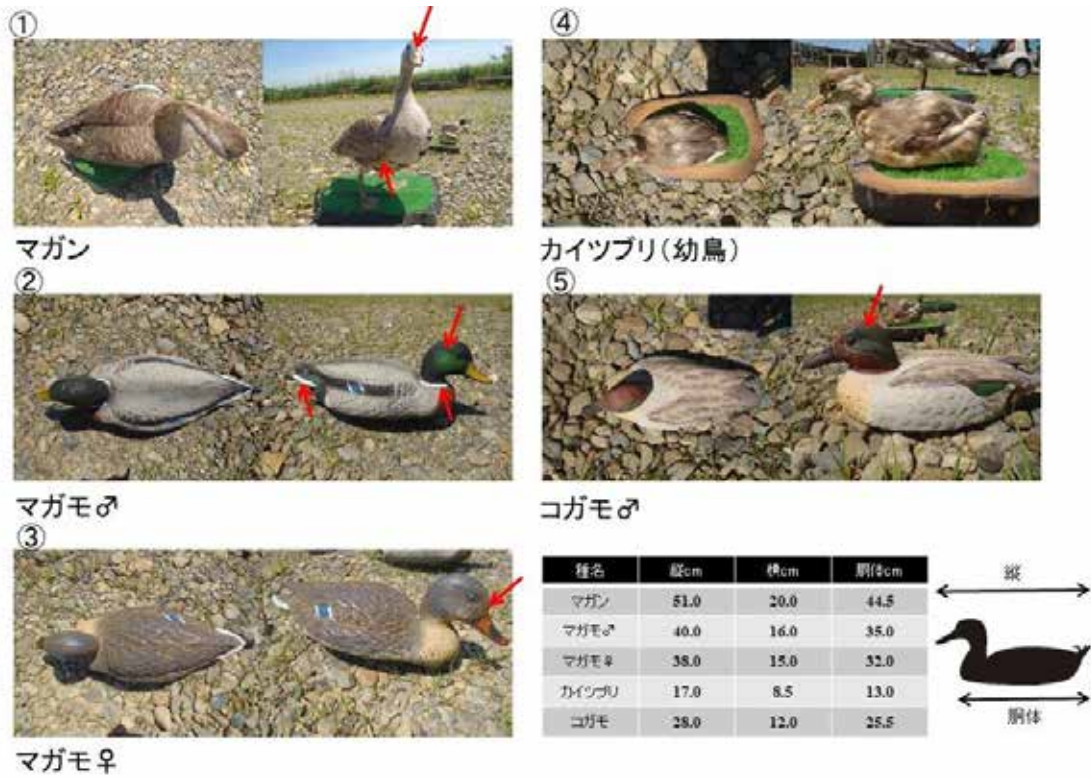


図 3-2-2 対象とした種とその特徴

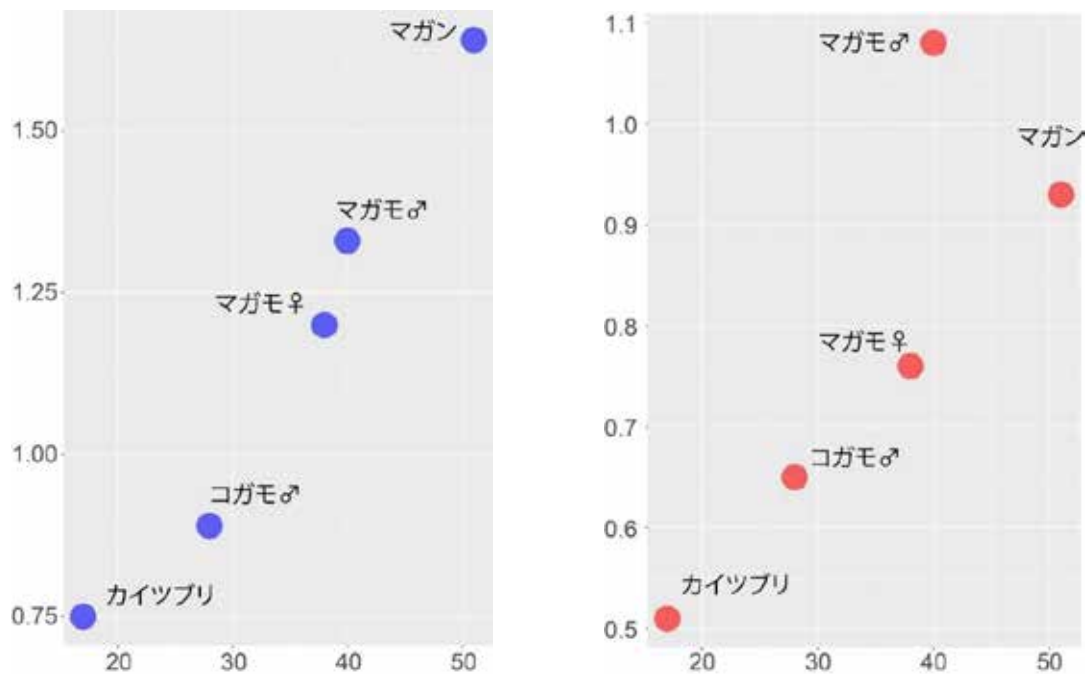


図 3-2-3 検知・識別できる解像度の推定値 (左) 検知 (右) 識別
 (X 軸: 体サイズ (縦 cm)、Y 軸: 解像度 (cm/pixel))
 目視での判別からモデル化した推定値

参考：DJI 社製のドローンに搭載しているカメラの解像度

表 DJI 社のドローンに搭載しているカメラの解像度と撮影高度（単位：cm/pixel）。

機種（カメラ）		撮影高度 40m	撮影高度 60m	撮影高度 80m	撮影高度 100m	撮影高度 120m	撮影高度 150m
Phantom4 Pro v2.0 Phantom4 Advanced		1.1	1.6	2.2	2.7	3.3	4.1
Mavic2Pro		0.9	1.4	1.9	2.4	2.8	3.5
Inspire2	X5S (DJI15mm)	0.9	1.3	1.7	2.2	2.6	3.3
	X7 (DL-S 16mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.7

3.3. マガンの撮影時におけるカメラ設定

3.3.1. 薄暗い環境下における撮影方法

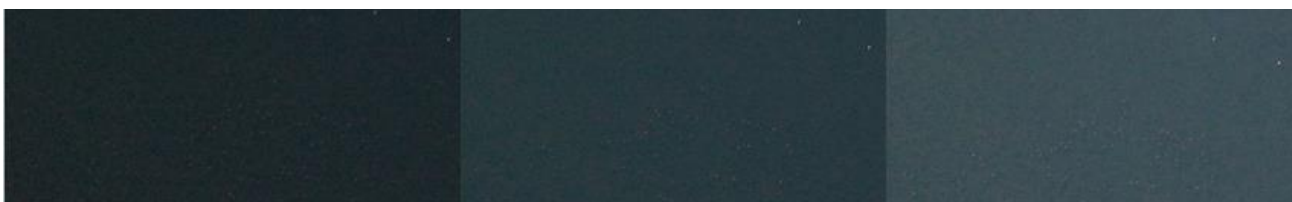
マガンの飛来数のカウントは、一般的に湖沼でマガンの休息している時間帯である日の出前（ねぐら立ち前）、もしくは日の入り後（ねぐら入り後）に実施する。そのため、マガンの撮影は日の出前、日の入り後といった薄暗い環境において実施する必要がある。



写真：日照の変化

（左から日の入り 10 分前、日の入り、日の入り 10 分後、日の入り 30 分）

ドローンに搭載されている標準のカメラは RGB カメラであり、薄暗い環境においてマガンを判別できるような明るい画像を撮影するためには、ISO 感度を高くする、もしくは露出時間を長くすることが一般的なカメラの設定方法である。



写真：同じ場所・時間に上空からマガンを撮影した ISO 感度が異なる写真の例

（左：ISO 感度低、中：ISO 感度中、右：ISO 感度高）

しかし、ISO 感度や露出時間を必要以上に高くしすぎると“明るすぎる”画像となる。また、一般的には ISO 感度を高くした画像はノイズが発生しやすくなり、ISO 感度を高くしすぎるとノイズによりマガンの判別が困難になる。さらに、ドローンは完全に固定された状態での撮影はできないため、露出時間を長くするとピントが合わずぶれた画像となる。そのため、薄暗い環境においてマガンを判別できる画像を取得できる“適度な”カメラ設定の検討が必要である。

3.3.2. カメラ設定の目安

マガンは日の出前後にねぐら立ちし、日の入り前後にねぐら入りする。宮島沼のねぐら入りの例では、日の入り後 5～10 分間に最もねぐら入りする個体数が多くなり（図 3-3-1 左）、総ねぐら入り数の 95%の個体がねぐら入りを完了する時間帯は日の入りから平均 15 分後（6～23 分）であることが推定されている。ドローンでの撮影を約 10 分から 15 分と想定すると、日の入り後 15～30 分の時間帯にマガンを判別できる画像を撮影できることが

カメラ設定の条件となる。

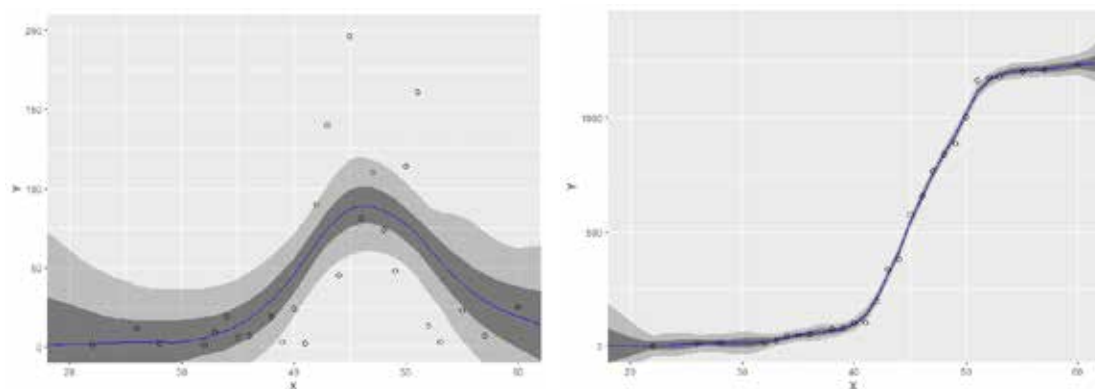


図 3-3-1 マガンのねぐら入りの累積個体数の例
(左：飛来数、右：累積数、X：日の入から 40 分前を 0、Y：個体数)

ISO 感度、露出時間についてマガンを判別できる画像を取得できた撮影時間を図 3-3-2 に例として示した。日の入り後 15～30 分の時間帯に安定した画像が取得できるカメラ設定は ISO 感度 6400、露出時間 1/10 が目安となる。

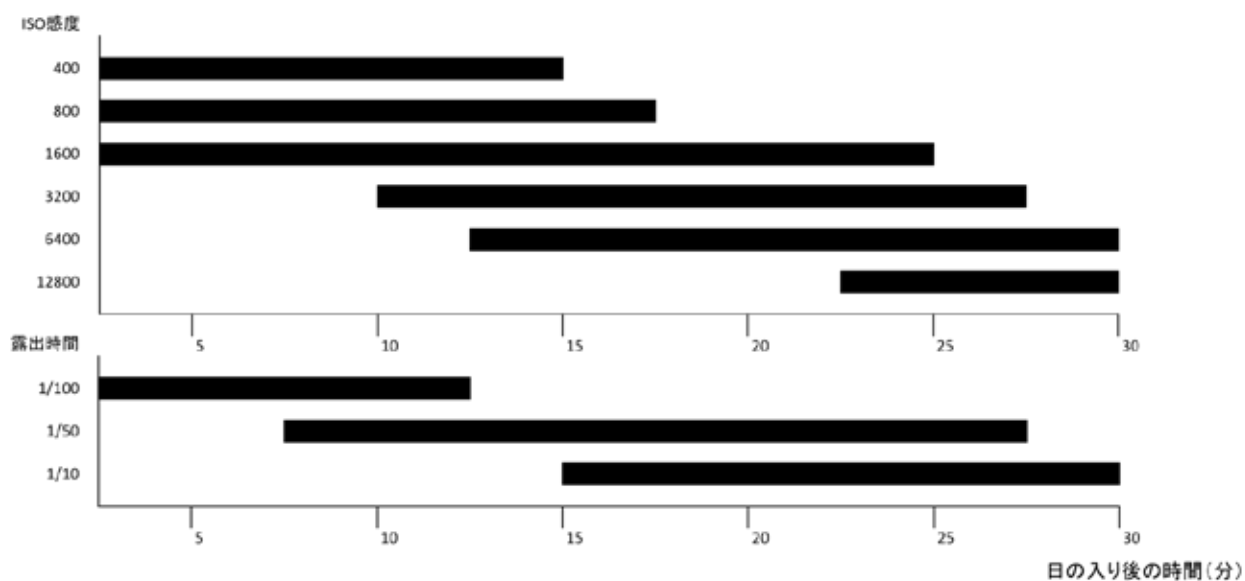


図 3-3-2 ISO 感度・露出時間別の撮影可能時間（線の範囲が撮影可能時間）

- ✓ 注意点として、今回提示したカメラ設定は目安であるため、天候による照度の変化も考慮する必要がある。また、露出時間を 1/10 など長く設定する場合には、ドローンをホバリングした状態での撮影を推奨する。

3.4. 鳥の行動への影響を最小化するための飛行高度の目安

前節では、対象とする水鳥を検知または識別するために必要な画像解像度を示すとともに、画像解像度の粗細と撮影できる範囲の広狭が、撮影高度に応じてトレードオフの関係にあることを示した。それらの点を踏まえ、飛行高度は対象種の検知・識別が可能な画像解像度を満たす高度以下で、かつ許容可能な飛行時間、飛行回数、撮影枚数等を満たす高度以上を選択する。そしてもう一つ、考慮すべき点は、鳥の攪乱の回避である。対象とする水鳥の群れがドローンを忌避して飛び去ってしまえば調査ができなくなる。また、群れの移動によって同じ個体が何度も写ったり逆に一度も写らなかったりすることで、調査結果に誤差が生じる。対象とする群れがドローンによって逃避することなく、確実にその場に留まる飛行高度を選択する必要がある。

ドローンの運用が想定される調査地は、ガンカモ類等の水鳥の比較的大規模な集団飛来地である。そのような調査地では、一般に水鳥の群れが広範囲に分布するため、数枚程度の撮影では調査地の全域を網羅することは困難であり、長距離を移動して多数の画像を取得する必要がある。その場合、通常は機体を一定の高度で水平に移動させる。一方、特定の群れや特定の個体を大きく写したい状況もある。その場合、ある程度高空まで上昇させ、対象とする群れや個体の上空まで移動させたのち、垂直降下によって接近させる方法がよいだろう。

本節では、機体を水平に接近させる時の飛行高度の目安と、機体を垂直降下させる時の下限高度の目安を示す（図 3-4-1）。機体を水平に接近させる時の飛行高度の目安は、垂直降下させる前の接近高度の目安でもある。

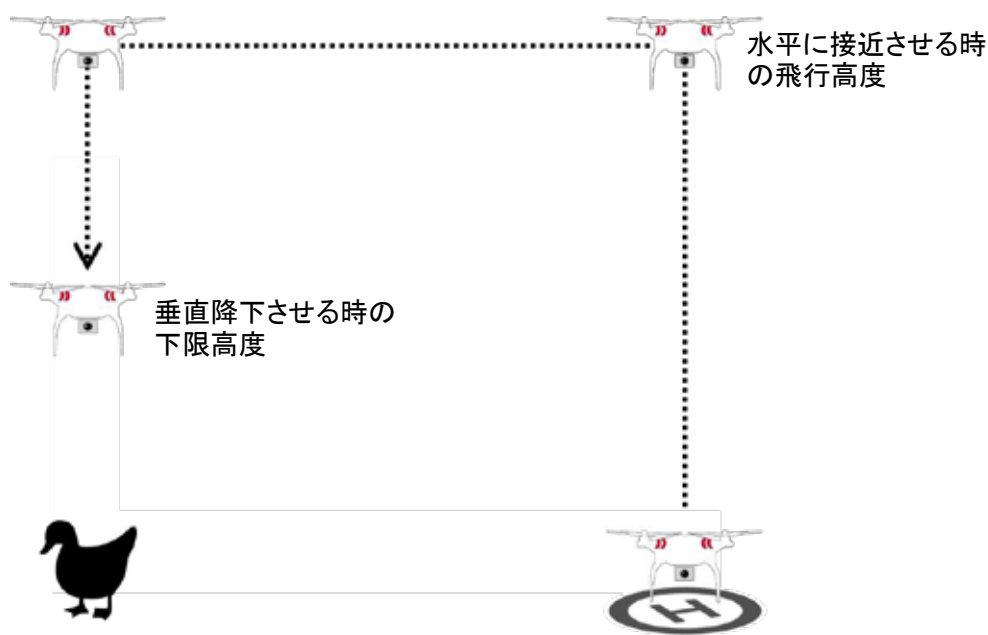


図 3-4-1 水平・垂直接近高度

【摘要】機体を水平に接近させる時の飛行高度の目安

- マガンの調査では、水面にいる群れを対象とする場合は、50m よりも高い高度で飛行させることが望ましい。一方、陸上にいる群れを対象とする場合は、理想的には150m よりも高い高度で飛行させることが望ましい。
- カモ類の調査では、100m よりも高い高度で飛行させることが望ましい。最低でも30m よりも高い高度で飛行させるべきである。
- ハクチョウ類の調査では、100m よりも高い高度で飛行させることが望ましい。最低でも20m よりも高い高度で飛行させるべきである。

*実際の調査時には、現地のガンカモ類の状況を考慮して適切な高度を選択する。

【摘要】機体を垂直降下させる時の下限高度の目安

- マガンの調査では、水面にいる群れを対象とする場合は、逃避行動が認められた最高高度の30m が下限高度の目安である。一方、陸上にいる群れを対象とする場合の下限高度は90m が目安である。
- カモ類の調査では、逃避行動が認められた最高高度の70m が下限高度の目安である。
- ハクチョウ類の下限高度の目安は、水面にいる群れを対象とする場合は80m、陸上にいる群れを対象とする場合は70m である。

*実際の調査時には、現地のガンカモ類の状況を考慮して適切な高度を選択する。

3.4.1. 水平接近実験

水平飛行時の高度の目安を得るため、ドローンの機体をガンカモ類の群れに接近させる実験を行った(図3-4-2)。実験は、機体離陸→その場で試験高度まで上昇→機首を群れに向けて前進→警戒・逃避行動があれば警戒レベルを記録→群れが飛び去るか、機体が群れの上空に到達した時点で実験終了、という手順で行った。警戒レベルは、0:無反応、1:機体を凝視する・首をもたげる、2:歩行や遊泳によって機体から遠ざかる、3:飛び去る、の4段階で判定した。また、警戒レベル0~1をまとめて「留まる」と表記した。試験高度は、5m、10m、15m、20m、25m、30m、40m、50m、60m、70m、80m、100mの中から適宜選択した。マガンは100mでも警戒レベル3(飛び去る)を示したことから、高度150mでも実験した。機体は、国内シェアの高い小型クアッドコプターであるDJI社 Phantom4を使用した。

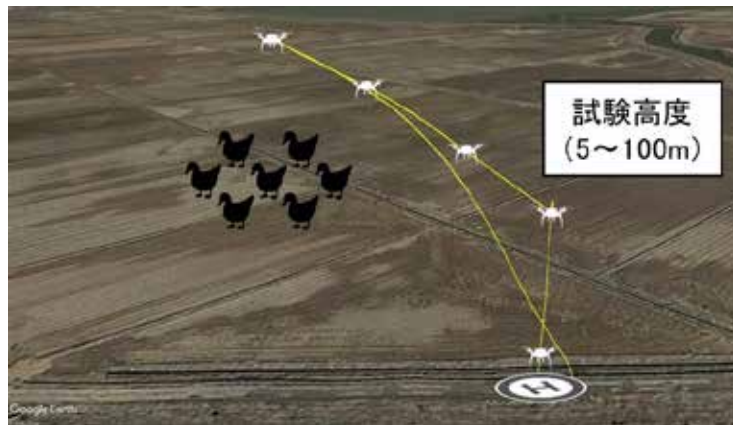


図 3-4-2 水平接近実験

水平接近実験の結果、マガンは高度 15m でその場に留まった事例があった一方で、最高高度である 150m で飛び去った事例もあった（図 3-4-3）。また、飛び去る頻度はカモ類やハクチョウ類に比べて顕著に多かった。ただし、150m で飛び去ったのは陸上にいる群れであり、水面にいる群れについては、飛び去った最高高度は 50m であった（図 3-4-4）。離陸地距離と同様、環境によって群れの反応に違いがあり、陸上にいる群れのほうが警戒する傾向があった。

ドローンに搭載するカメラの仕様によるが、高度 150m 以上からの撮影では多くの場合、マガンのような比較的大型の鳥であっても解像度の不足が生じる。したがって、陸上にいるマガンの群れを対象にする場合、逃避リスクをとめないつつ実用可能な解像度が得られる高度で飛行させるか、もしくは焦点距離の長いカメラを搭載して 150m 以上の高空から撮影する必要があるだろう。

カモ類は、水面にいる群れのみを対象として実験した。その結果、10~100m の高度で機体から遠ざかる反応（警戒レベル 2）が、10m および 30m で飛び去る反応（警戒レベル 3）が認められた。一方、全 335 例中 306 例（91%）では、無反応または機体を見ただけでその場に留まった。

ハクチョウ類は、10~100m の高度で機体から遠ざかる反応（警戒レベル 2）が、10~20m の高度で飛び去る反応（警戒レベル 3）が認められた。水面にいる群れ、陸上にいる群れのいずれも、飛び去った最高高度は 20m であった（図 3-4-5）。機体から遠ざかった高度は、陸上にいる群れについては 60m 以上の高度では実験できていないものの、既存のサンプルにおいては陸上が水面の中央値を上回った。マガンと同様、陸上にいる群れのほうが警戒する傾向があると考えられる。

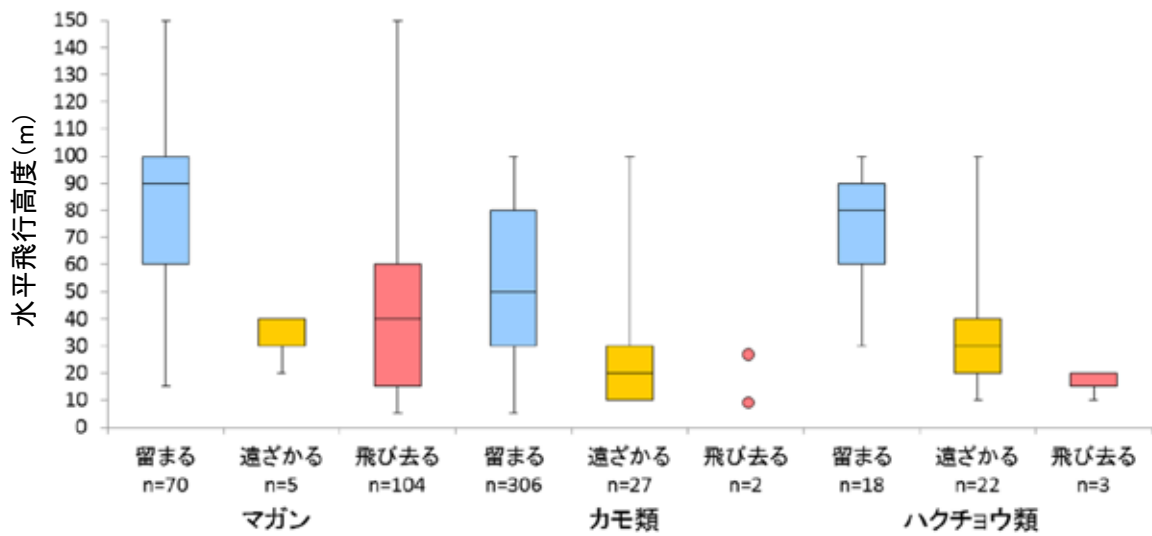


図 3-4-3 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応

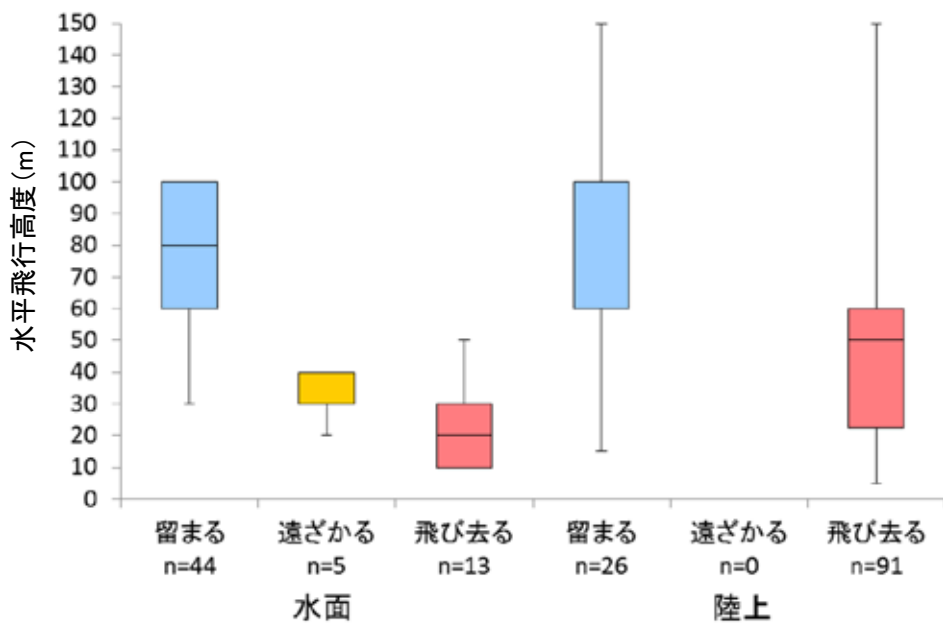


図 3-4-4 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応（マガン、環境別）

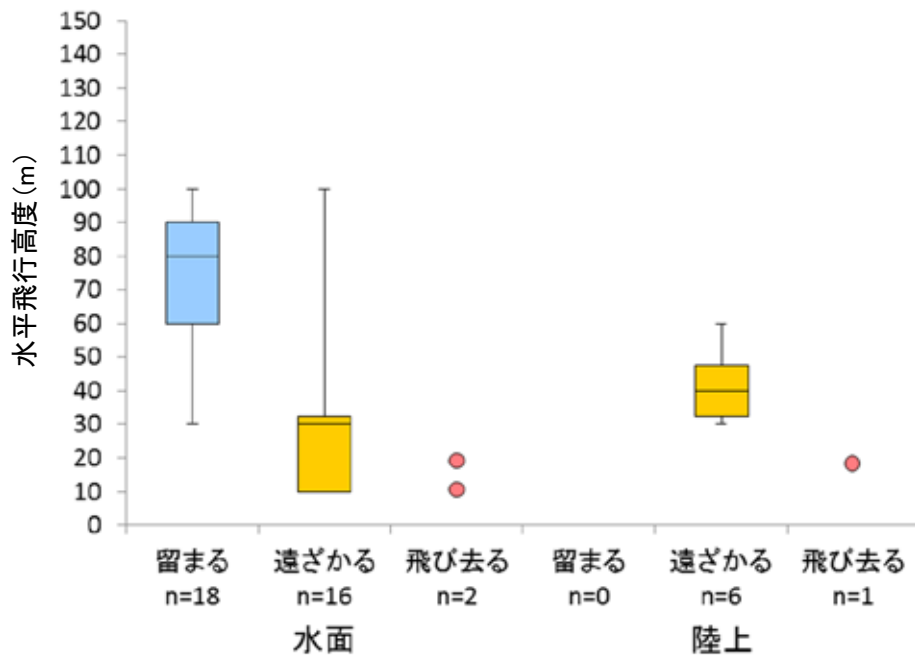


図 3-4-5 水平接近する機体に対するガンカモ類の反応（ハクチョウ類、環境別）

3.4.2. 垂直接近実験

垂直降下時の下限高度の目安を得るため、ドローンの機体をガンカモ類の群れに接近させる実験を行った（図 3-4-6）。実験は、機体離陸→その場で高度 100m まで上昇→機首を群れに向けて前進→群れの上空に達し次第、降下を開始→警戒行動があれば警戒レベルとその時点の機体高度を記録→群れが飛び去るか、機体が高度 10m まで到達した時点で実験終了、という手順で行った。警戒レベルは、水平接近実験と同じく 0～3 の 4 段階で判定し、警戒レベル 2～3 をまとめて「逃避行動」として整理した。警戒レベルと同時に記録する機体高度は、タブレット等にインストールしたフライトアプリ（DJI GO または Litchi）の画面に表示される高度をリアルタイムで記録するか、現場で記録した時刻とフライトログを後で突き合わせて高度を読み取った。機体は、水平接近実験と同じく DJI 社 Phantom4 を使用した。

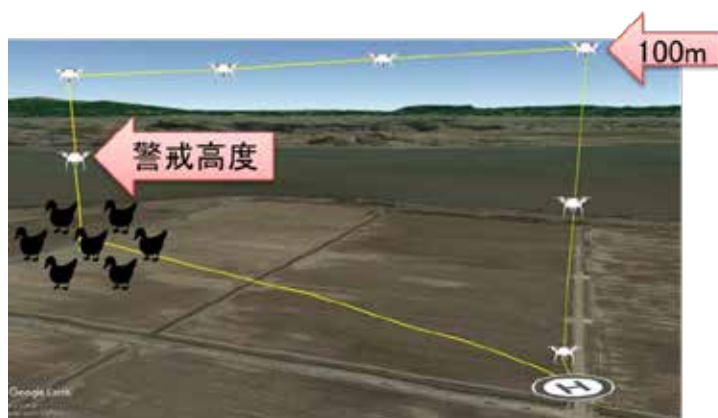


図 3-4-6 垂直接近実験

マガンは、水面にいる群れでは 30m 以下の、陸上にいる群れでは 90m 以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動（警戒レベル 2～3 の反応）が認められた（図 3-4-7）。カモ類は、70m 以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動が認められた（夜行性のカモ類は日中水面にいるため、水面にいる群れのみ実験を行った）。ハクチョウ類は、水面にいる群れでは 74m 以下の、陸上にいる群れでは 64m 以下の高度まで機体を降下させた時に逃避行動が認められた。この逃避行動が認められた最高高度が、垂直降下時の下限高度の目安となる。ハクチョウ類では、逃避行動が認められた高度の中央値は、水面 24m、陸上 46m で、陸上にいる群れが上回った。マガンとハクチョウ類において、水面にいる群れよりも陸上にいる群れのほうが逃避する傾向があることは水平接近実験の結果と同様であった。陸上は水鳥にとって水面よりも危険の多い場所であり、警戒心が強まるものと考えられる。

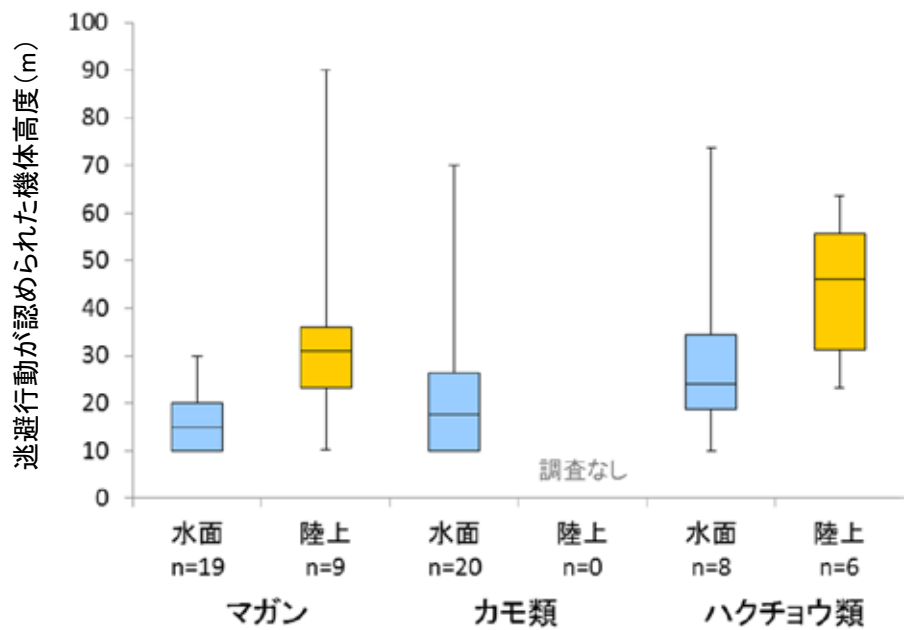


図 3-4-7 垂直降下時に逃避行動が認められた機体高度

3.5. 飛行高度目安早見表

前節までで、ガンカモ類の“検知”や“識別”に必要な解像度及びその解像度を満たす撮影高度と、鳥の行動への影響を最小化するための飛行高度の目安を示した。フライトプランを策定する際、速やかに高度を選択できるよう一覧にしたので参考にさせていただきたい。

表 飛行高度目安一覧

対象種	飛行方式	群れの居場所	群れの反応	例数	統計量		目視で“検知”可能な解像度(推定値)及びその解像度を満たすDJIドローンの飛行高度(参考)				目視で“識別”可能な解像度(推定値)及びその解像度を満たすDJIドローンの飛行高度(参考)			
					攪乱回避の飛行高度の目安	最大値	最小値	機種	最大値	最小値	機種	最大値	最小値	
マガン	水平飛行	水面	遠ざかる	5	最大値	40 m <	約1.7cm/pixel				約0.9cm/pixel			
					平均値	32 m <								
		飛び去る	13	最大値	50 m <	Phantom4	42 m >=	Phantom4		22 m >=				
				平均値	25 m <	Phantom4 Pro	62 m >=	Phantom4 Pro		33 m >=				
	陸上	遠ざかる	なし	最大値	-	Mavic2Pro	71 m >=	Mavic2Pro		37 m >=				
				平均値	-	Inspire2 (X5S,DJI15mm)	78 m >=	Inspire2 (X5S,DJI15mm)		41 m >=				
		飛び去る	91	最大値	150 m <	Inspire2 (X7,DL-S 16mm)	69 m >=	Inspire2 (X7,DL-S 16mm)		37 m >=				
				平均値	47 m <									
	垂直接近	水面	逃避	19	最大値	30 m <								
					平均値	17 m <								
陸上		逃避	9	最大値	90 m <									
				平均値	35 m <									
カモ類	水平飛行	水面	遠ざかる	27	最大値	100 m <	マガモ(♀) 約1.19cm/pixel				マガモ(♀) 約0.75cm/pixel			
					平均値	25 m <	コガモ(♂) 約0.88cm/pixel				コガモ(♂) 約0.65cm/pixel			
		飛び去る	2	最大値	30 m <			マガモ	コガモ	マガモ	コガモ			
				平均値	20 m <	Phantom4	29 m >=	22 m >=	Phantom4	18 m >=	16 m >=			
	垂直接近	水面	逃避	20	最大値	70 m <	Phantom4 Pro	43 m >=	32 m >=	Phantom4 Pro	27 m >=	24 m >=		
					平均値	21 m <	Mavic2Pro	49 m >=	37 m >=	Mavic2Pro	31 m >=	27 m >=		
							Inspire2 (X5S,DJI15mm)	54 m >=	40 m >=	Inspire2 (X5S,DJI15mm)	34 m >=	30 m >=		
		陸上	逃避	6	最大値	60 m <	Inspire2 (X7,DL-S 16mm)	49 m >=	36 m >=	Inspire2 (X7,DL-S 16mm)	31 m >=	27 m >=		
					平均値	42 m <	No data				No data			
ハクチョウ類	水平飛行	水面	遠ざかる	16	最大値	100 m <								
					平均値	31 m <								
		飛び去る	2	最大値	20 m <									
				平均値	15 m <									
	陸上	遠ざかる	6	最大値	60 m <									
				平均値	42 m <									
		飛び去る	1	最大値	20 m <									
				平均値	20 m <									
垂直接近	水面	逃避	8	最大値	74 m <									
				平均値	31 m <									
	陸上	逃避	6	最大値	64 m <									
				平均値	44 m <									

3.6. ガンカモ類がドローンから逃避する要因

多くの場合、ガンカモ類は接近するドローンを警戒し、許容範囲を超えると逃避する。鳥がドローンを忌避する主な要因としては、機体の接近という視覚的な要素と、ローターが回転することで発生する風騒音（以下、ローター音）という聴覚的な要素の 2 つが考えられる。忌避要因を把握できれば、攪乱を避けるための対策をよりの確に選択できるようになるだろう。例えば、ローター音が要因であるなら静音性に優れた機体を使用し、機体そのものが要因であるなら機体の大きさ・形状・色を考慮するなどである。本節では、ガンカモ類がドローンから逃避する要因について検討した。

【摘要】ガンカモ類がドローンから逃避する要因

- ドローンの接近に伴うガンカモ類の逃避行動は、機体そのもの、すなわち視覚的な刺激が主因となって生じるものと考えられる。
- ただし、ハクチョウ類においてはローター音のみでも逃避行動が認められた。近距離であると、騒音という聴覚的な刺激も忌避要因になるものと考えられる。

ドローンのローター音が忌避要因であるのか明らかにするには、機体が鳥の視界に入らないようにし、ローター音のみを鳥に聞かせる必要がある。そこで、予め録音しておいたローター音をガンカモ類の群れに向かってオーディオで再生し、群れの反応を記録した。しかしそれだけでは、ガンカモ類が聞いていたローター音の騒音レベルはわからない。そのため、距離に応じた騒音の減衰を表す統計モデルを先に作成し、そのモデルによってガンカモ類の位置の騒音レベルを推定した。

3.6.1. 騒音減衰モデルの作成

距離に応じたローター音の理論値を推定するために、計測したローター音から減衰モデルを作成した。三脚に固定した騒音計を起点として、ドローン (DJI Phantom 4 Pro) を水平かつ直線的に 150m (一部 100m) まで遠ざけ、10m 毎にホバリングさせてローター音を計測した (図 3-6-1)。マルチローター型の機体は、各ローターの回転数を上下させることで姿勢や移動を制御するため、同じ距離でも風によってローター音が異なる可能性がある。そのため、微風時 (平均風速 0.2m/s) と強風時 (平均風速 2.9m/s) の 2 つの風況下で実験を行った。また、音の減衰は距離だけでなく地面の吸音による減衰もあり、吸音性は植生などの地面の状態によって異なる可能性がある。そのため、2 つの風況下それぞれで、ガンカモ類の主な生息環境である水面と農地の 2 つの環境上空において実験を行った。くわえて、

機体を 10m 毎にホバリングさせず、連続的に遠ざけながら 1 秒間隔で細かく騒音を計測する実験も行った。この実験は、微風時（平均風速 0.2m/s）のみ行った。

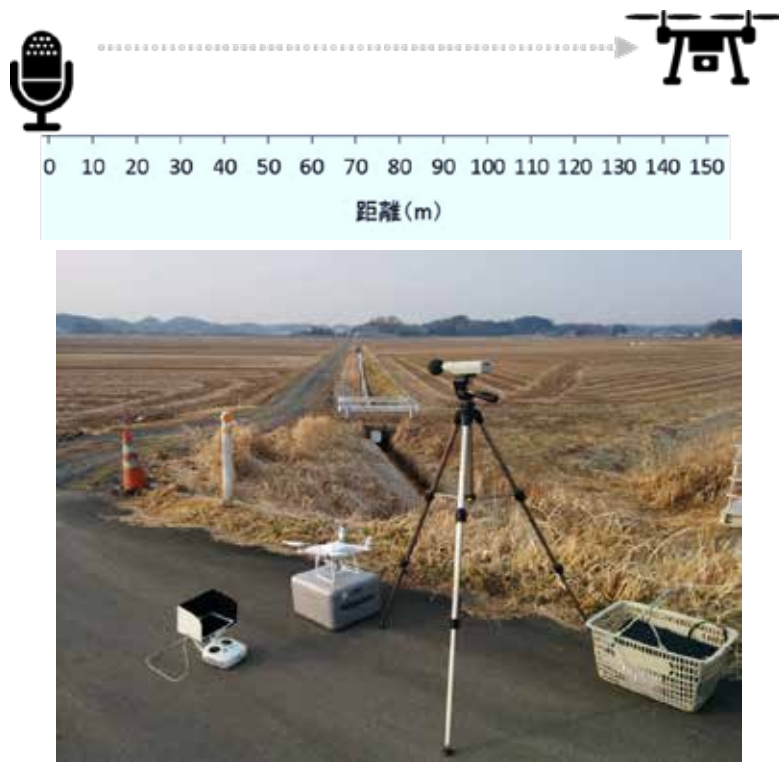


図 3-6-1 騒音減衰モデルを作成するための調査

実験の結果、ローター音はどの項目においても起点から 30m 程度離れるまでに大きく減衰し（約 75%減衰）、それ以遠では緩やかに減衰した（図 3-6-2）。対数近似によっていずれも適合度が良好で互いに近似したモデルが得られた。

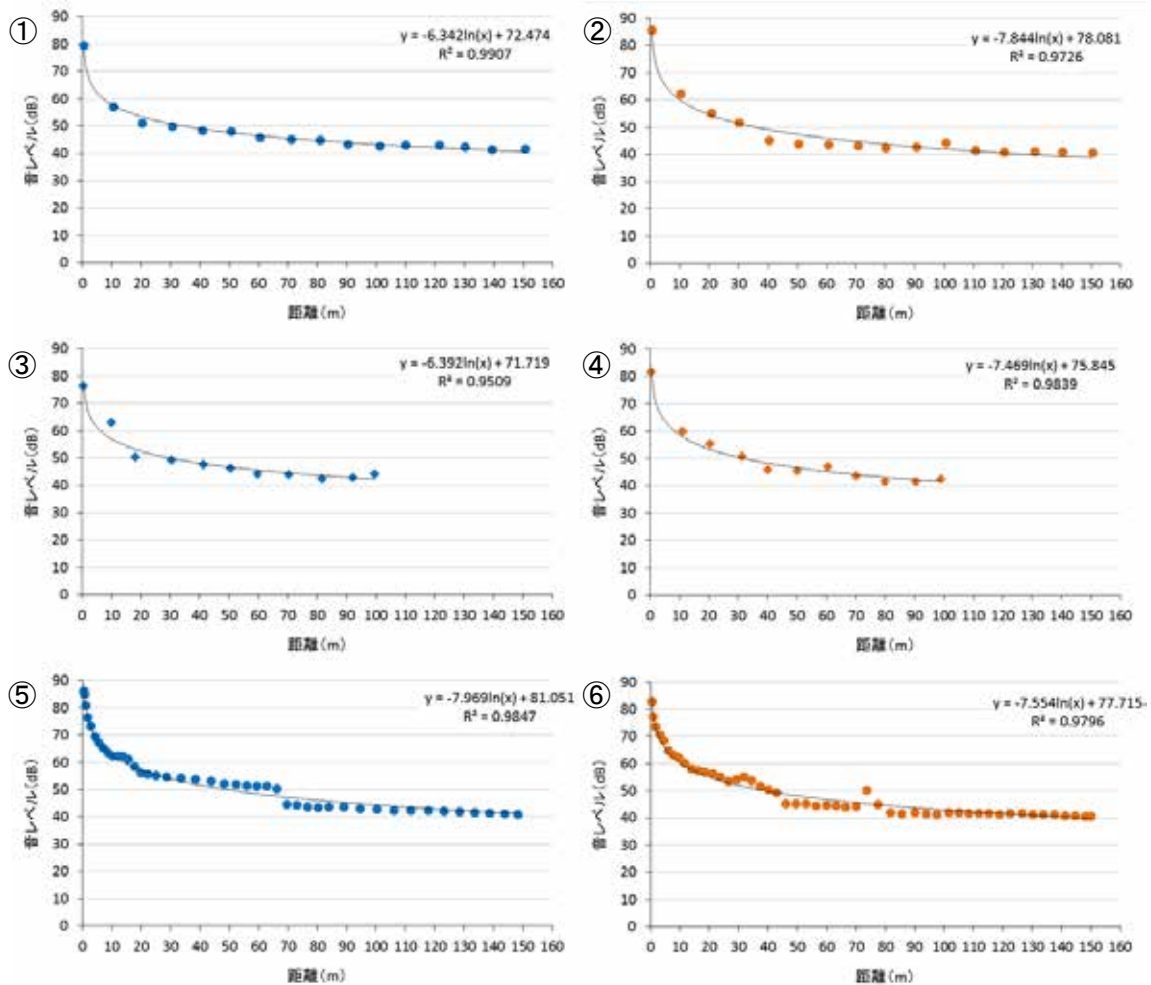


図 3-6-2 騒音減衰モデル

①微風下の水面上空、②微風下の農地上空、③強風下の水面上空、④強風下の農地上空、⑤微風下の水面上空、⑥微風下の農地上空 (①～④：10m 毎に機体をホバリングさせて騒音を計測、⑤～⑥：連続的に機体を遠ざけながら騒音を計測)

3.6.2. ドローンのローター音に対するガンカモ類の反応

簡易ブラインドとして軽自動車で群れに接近し、群れまでの距離をレーザーで計測したのち、スピーカーを手にとって予め録音しておいたローター音を群れに向かって再生した。この時、スピーカーから 1m 離れた地点の騒音レベルが、水面にいる群れを対象にする場合は 72dB に、農地にいる群れを対象にする場合は 78dB になるように音量を調節した。これらの値は、騒音減衰モデルから算出した距離 1m の騒音レベルである。群れまでの距離に基づき、群れの位置の騒音レベルをモデルから推定した。騒音に対するガンカモ類の反応は、4 段階の警戒レベル (下記) に分けて記録した。警戒レベル 0：無反応、警戒レベル 1：首をもたげる・音源を注視する、警戒レベル 2：歩行または遊泳によって遠ざかる、警戒レベル 3：飛び去る (警戒レベル 2～3 をまとめて逃避行動とした)。

1) ガン類

農地にいるマガンの群れを対象とした（群れまでの距離 36～218m、n=10）。その結果、距離 40m で首をもたげる行動（警戒レベル 1）が 1 例認められた以外は全て無反応（警戒レベル 0）であった（図 3-6-3）。さらに近距離の調査も試みたが、36m 未満まで接近すると、ローター音を再生する前から逃避行動が認められ、調査できなかった。前述の接近反応調査では、水平接近実験において機体と群れの直線距離が 11～326m の時に逃避行動が認められた。接近するドローンに対して逃避行動が認められた機体と群れの最長距離である 326m に騒音減衰モデル（図 3-6-2）をあてはめると、機体から 326m 離れた位置の騒音レベルは 33dB と推定された。33dB は、飛行するドローンのない普段の水田地帯の騒音レベル（37dB 程度）よりも低い値であり、この時の距離ではドローンがない環境と同様の騒音であったと考えられる。

これらのことから、少なくとも 36m 以上の距離で発せられる 50dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音はほとんど忌避要因になっておらず、逃避行動は機体の接近という視覚的な刺激が主因となって生じたものと考えられる。

2) ハクチョウ類

農地にいるオオハクチョウの群れを対象とした（群れまでの距離 14～113m、n=10）。その結果、距離 25m で首をもたげる行動（警戒レベル 1）が、距離 14m と 19m で歩いて遠ざかる行動（警戒レベル 2）が認められた。25m 以上では、全て無反応（警戒レベル 0）であった。接近反応調査では、垂直接近実験において 64m 以下の距離で逃避行動が認められた。なお、水平接近実験では、機体と群れの直線距離が得られたサンプルがなかった。したがって接近実験で逃避行動の認められた 25～64m において、ローター音のみの実験の 1 例を除けば無反応であった。以上のことから、25m 以上の距離で発せられる 53dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音は忌避要因になっていないものと考えられる。一方、距離 14～19m（57～55dB）においてはローター音のみでも逃避行動が認められたことから、騒音という聴覚的な刺激も近距離であると忌避要因になるものと考えられる。

3) カモ類

水面にいるマガモおよびカルガモの群れを対象とした（群れまでの距離 42～70m、n=6）。その結果、警戒行動（警戒レベル 1）や逃避行動（警戒レベル 2～3）は認められず、全て無反応（警戒レベル 0）であった。接近反応調査では、水平接近実験において機体と群れの直線距離が 10～50m の時に逃避行動が、垂直接近試験において 70m 以下の距離で逃避行動が認められた。したがって、少なくとも 42m 以上の距離で発せられる 49dB（騒音減衰モデルの推定値）以下のローター音は忌避要因になっていないものと考えられる。

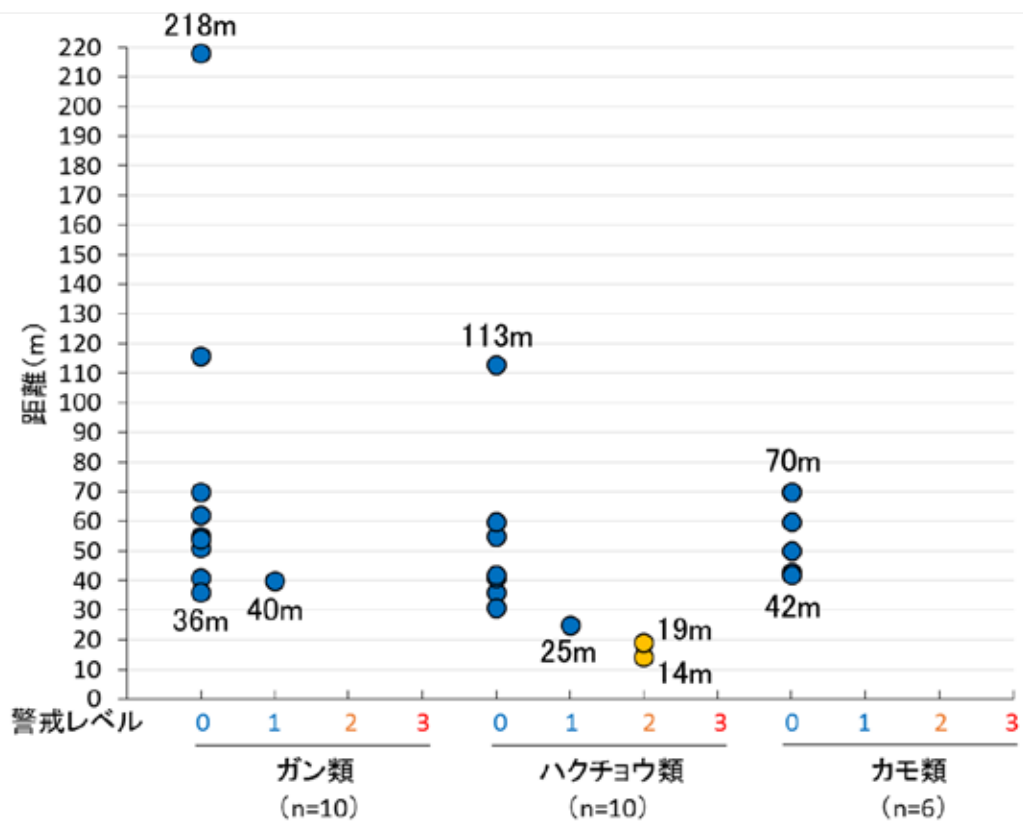


図 3-6-3 録音・再生したローター音に対するガンカモ類の反応

3.7. 熱赤外カメラの活用可能性

本推進費事業にて開発した UAV には、高感度カメラ : Sony α7 および熱赤外カメラ : FLIR Vue Pro を同時に搭載でき、両者の比較撮影を試みた。2017 年 2 月に宮城県内沼にて撮影を実施した結果では、50 m 程度の高度から高感度カメラではマガンを捉えることができたが、熱赤外カメラ画像からマガンのカウントは不可能であった。

熱赤外カメラの仕様から考え、空間分解能としては十分なはずであり、事前の昼間の地上テスト撮影でも捉えることができたが、マガンの体表面と水面の温度差がほとんど無いことが原因と推定している。

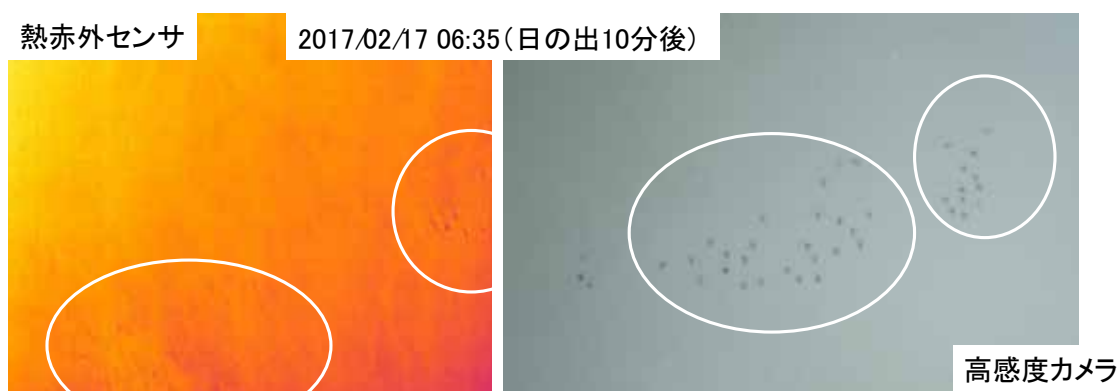


図 3-7-1 熱赤外カメラ（センサ）で撮影した画像（左）と高感度カメラ（右）で撮影した画像。

このケースでは早朝の撮影であるが、夕方の撮影では温度に差異がある可能性も否定できないので、今後の検討が望まれる。

4. 画像解析による自動カウント

本章では UAV で撮影した画像を解析し自動でカウントを行う手法について解説する。

4.1. マガンの自動カウントの概要

マガンのカウントを目的とした UAV 画像には一枚に多数のマガンが写っている。例えば 図 4-1-1 は UAV 画像の一部であるがこの領域に 4,983 羽のマガンが写っている。これは目視にてマーキングをしつつ数えた結果であるが、非常に大きな労力を要する。



図 4-1-1 2018 年 4 月 27 日に北海道宮島沼にて DJI Inspire2、Zenmuse X5S にて撮影した画像の一例

これを機械学習を利用して自動でカウントする手法およびソフトウェアを本推進費事業にて開発した。そのソフトウェアを用いて図 4-1-1 の画像を解析した結果を図 4-1-2 に示す。少ない誤差で正確にカウントができていることが分かる。

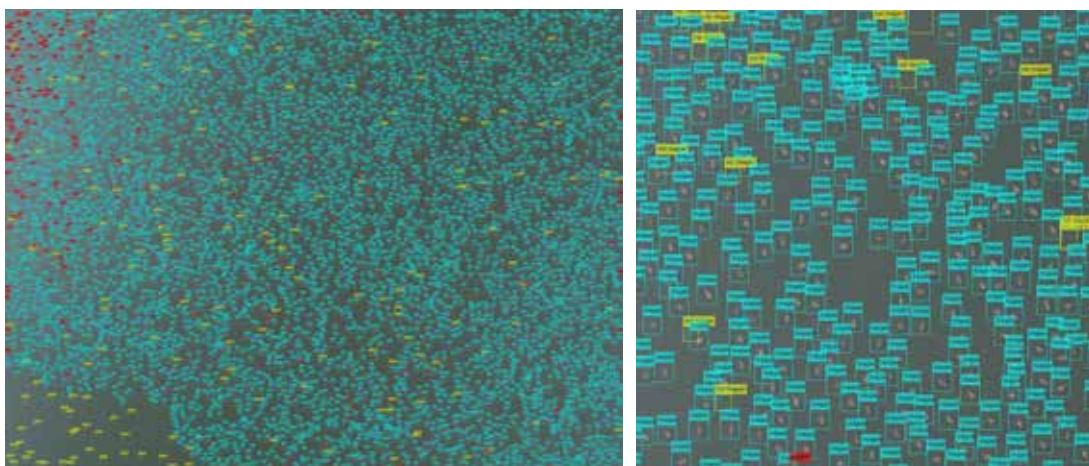


図 4-1-2 マガン自動カウント・ソフトウェアによる画像解析結果。
左は全体図で、右は画像中央付近の拡大図。

4.2. マガン自動カウント・ソフトウェアについて

本推進費事業で開発した「MaganTrainer2」を紹介する。本ソフトウェアは MathWorks 社の MATLAB 上で動作する。ソースコードについては、ホームページ⁵にて公開する予定である（図 4-2-1）。本ソフトウェアを利用するためにはいくつかの必要条件がある。

- 動作環境
 - Windows が動作する PC で MATLAB® R2016a を用いて開発している。
- 自動カウントの対象としている写真
 - 教師データとして用いる画像は以下のいずれかのカメラ・レンズで撮影している。この画像にて性能を確認している。いずれも GSD が 2.7 cm 程度の画像である。
 - ◇ 約 100 m の高度から 35 mm 換算で焦点距離 24 mm のレンズ
 - ◇ 約 140 m の高度から 35 mm 換算で焦点距離 35 mm レンズ
 - 水面と水鳥（マガン）のコントラストが十分に確保できている。

⁵ <https://sites.google.com/site/kentaogawa/Home/semi-automated-counting-of-birds-from-uav-image>



図 4-2-1 マガン自動カウントソフトウェア紹介ページ（2019 年 5 月ごろ公開予定）

4.3. 画像解析による自動カウントの課題と今後について

現在 **deep learning** を応用した物体検出アルゴリズムを開発しており、上記ソフトウェアとほぼ同等の性能が出ている。今後のチューニング次第でさらに性能が向上する可能性がある。準備ができ次第このソフトウェアも前記の同じ **Web** サイトにて公開する予定である。

5. 付録

5.1. ドローンの位置精度検証

ドローンは、GNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）、気圧計、IMU（Inertial Measurement Unit / 慣性計測装置）といった様々な計器を搭載している。ドローンを用いたガンカモ類の調査では自動操縦を多用するが、自動操縦では、GNSS によって決定される水平的な位置と、主に気圧計によって決定される垂直的な位置（＝高度）によって機体の移動が制御される。また、それらの位置情報が、撮影した画像に書き込まれる。したがってドローンの位置精度は、飛行や画像解析の正確性に強く影響する。そこで本節では、実機を用いて水平位置精度と垂直位置精度を検証した。機体は、国内シェアの高い小型クアッドコプターである DJI 社 Phantom4 を用いた。あくまで一機種の実験結果ではあるが、代表的なドローンについて性能の実情を把握することは有益と考えられる。

【摘要】ドローンの位置精度

- 一般に普及している単独測位方式の機種（DJI 社 Phantom4 の場合）では、水平位置誤差は平均 $1.6\text{m} \pm$ 標準偏差 0.3m （最小値 1.0m ～最大値 2.4m 、 $n=42$ ）であった。
- 垂直位置誤差は、上昇時で平均 $2.0\text{m} \pm$ 標準偏差 1.3m （最小値 0.0m ～最大値 4.2m 、 $n=10$ ）、下降時で平均 $2.8\text{m} \pm$ 標準偏差 1.1m （最小値 1.1m ～最大値 4.7m 、 $n=10$ ）であった。

5.2. 水平位置精度の検証

地理座標が正確にわかっている地点を基準点とし、その基準点をドローンの GNSS で測定した位置を測位点とし、基準点と測位点の水平距離を求めてドローンの測位誤差とした。基準点は、国土地理院の四等三角点である新伊豆崎 ($38^{\circ}42'30.8''\text{N } 141^{\circ}06'06.0''\text{E}$) とした。三角点等は、国土地理院が測量し、地理座標を公開しているが、地殻変動によってわずかに移動している可能性もあることから、当該三角点の位置は自ら測量した。測量は、当該三角点を観測局、最寄りの電子基準点：南方 ($38^{\circ}39'38.2''\text{N } 141^{\circ}09'38.7''\text{E}$) を基準局として、数 cm の誤差で位置が決定される RTK 法によって行った。観測局にて 1 周波受信機を用いて約 30 分間観測し、後日、国土地理院 web サイトより電子基準点のデータを入手し、後処理計算によって観測局の座標を求めた。RTK 法による基準点の測量は、2018 年 10 月 19 日に行った。一方、ドローンの GNSS による測位点の収集は、2017 年 1 月 8 日と 2017 年 3 月 30 日に行った。直径 30m 程度の円を描くように機体を水平に飛行させたのち、基準点（三角点の標柱上）に設置した高さ 30cm の台上に、機体がちょうど標柱の真上にくるよう

に離陸させ、その時の時刻を記録した（図 5-2-1）。離陸→環状飛行→着陸→時刻記録という手順を繰り返し行い、記録した時刻に対応する経緯度を後でフライトログから読み取った。



図 5-2-1 ドローンの GNSS による基準点の観測

実験の結果、Phantom4 の水平位置誤差は平均 $1.6\text{m} \pm$ 標準偏差 0.3m （最小値 1.0m ～最大値 2.4m 、 $n=42$ ）であった（表 5-2-2）。1 月 8 日の測位点は真の位置よりも北側 1.3m 付近に分布し、3 月 30 日の測位点は真の位置よりも南側 1.8m 付近に分布した（図 5-2-3）。各日、特定の場所に測位点が集中する傾向があったが、これには当時の捕捉衛星の配置が関係しているものと考えられる。今回の実験では、Phantom4 の測位誤差はすべて 3m 以内であり、ハンディ端末等の一般的な単独測位方式の GNSS 受信機と同等かそれ以上の精度と言える。通常、ドローンは今回の実験時と同じく衛星捕捉の条件のよい開放的な空間を飛行することから、常に同程度の水平位置精度が出るものと考えられる。

表 5-2-2 DJI 社 Phantom4 の水平位置精度

試験日	n	平均	標準偏差	最小値	最大値
2017 年 1 月 8 日	20	1.3	0.2	1.0	1.5
2017 年 3 月 30 日	22	1.8	0.2	1.2	2.4
総合	42	1.6	0.3	1.0	2.4

単位:m

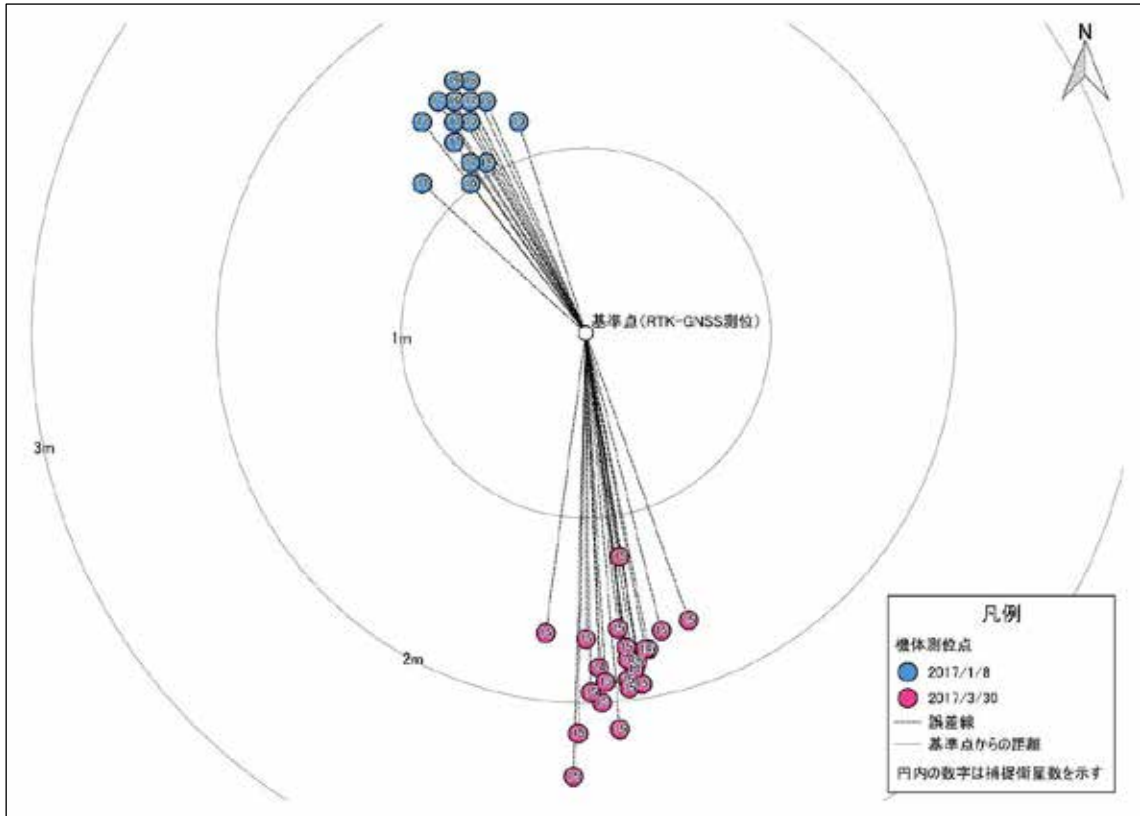


図 5-2-3 機体測位点と基準点の位置関係

5.3. 垂直位置精度の検証

レーザー距離計によって計測された機体高度を基準高度とし、ドローンの気圧計によって計測された機体高度を観測高度とし、基準高度と観測高度の差をとってドローンの垂直位置誤差とした。基準高度は、ドローンを上空 10m から 100m まで 10m 毎にホバリングさせ、レーザー距離計 (Nikon LCS80IVR) を用いて機体の高度を 0.2m 単位で計測した。計測は、機体を上昇させながら行ったのち (10m→100m)、下降させながら行った (100m→10m)。これらのレーザー計測による高度は、計測者の目の高さからの高度である。よって地面からの高度に変換するため、計測者の目の高さ 1.7m を計測値に加算した。一方、ドローンの気圧計による高度は、レーザー計測と同時に時刻を記録しておき、その時刻に対応する気圧高度を後でフライトログから読み取った。フライトログの気圧高度は離陸地点からの相対高度である。実験では、ドローンを台上から離陸させていた。そのため、台の高さ 0.22m をフライトログの高度に加算し、地面からの高度に変換した。

実験の結果、Phantom4 の垂直位置誤差は、上昇時で平均 2.0m±標準偏差 1.3m (最小値 0.0m～最大値 4.2m、n=10)、下降時で平均 2.8m±標準偏差 1.1m (最小値 1.1m～最大値 4.7m、n=10) であった (表 5-3-1)。高空であるほど誤差が大きい傾向が認められた (Spearman 順

位相関係数、 $p=0.90$ 、 $P<0.01$ 、図 5-3-2)。上昇時より下降時のほうが誤差が大きいようにも見えるが、有意な差異は認められなかった（Mann-Whitney U 検定、 $U=34$ 、 $P=0.23$ 、図 5-3-2）。

表 5-3-1 DJI 社 Phantom4 の垂直位置精度

試験日	n	平均	標準偏差	最小値	最大値
上昇時	10	2.0	1.3	0.0	4.2
下降時	10	2.8	1.1	1.1	4.7
総合	20	2.4	1.3	0.0	4.7

単位:m

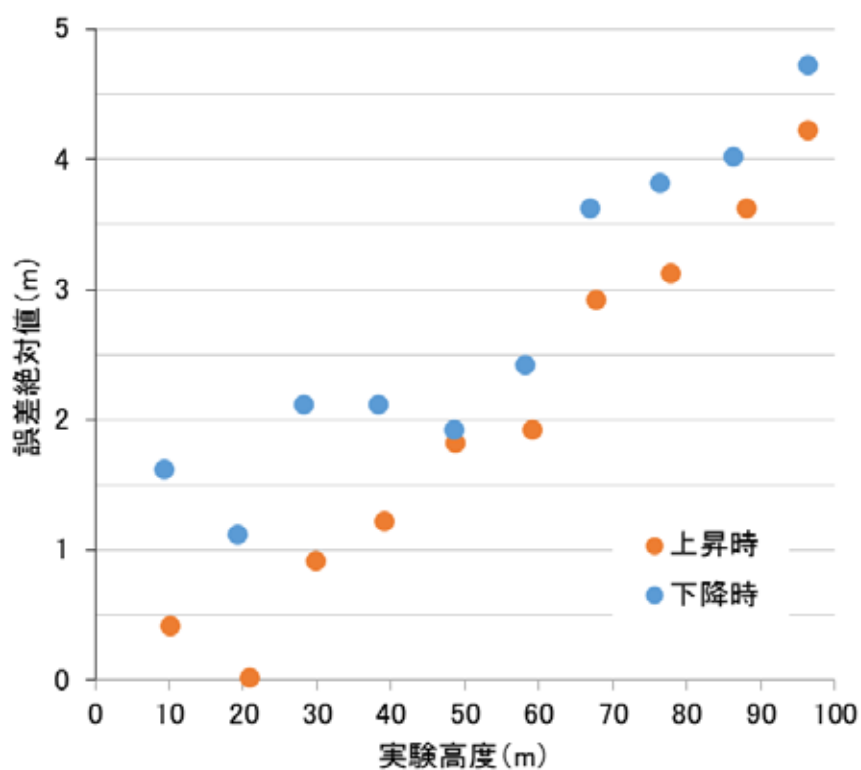


図 5-3-2 高度と誤差の関係

5.4. ドローンのヒヤリハット事例

- バッテリー切れ

ガンカモ類の調査のためには水上でドローンを飛ばすことが多く、電池がなくなっても着陸させることができない。ガンカモ調査は冬期の低温時や風の強い時期に行うため、通常よりもバッテリーの消耗が早くなるため注意が必要である。例えば、ドローンの仕様上の飛行時間が 30 分あるとすれば、念のため 20 分程度で帰還させる。

また、急な停止や発進をするとモーターの回転が増すために電力消費が増える。バッテリーが減っているときにそうした操作をすると、瞬間的に電圧が低下するために、バッテリーの回路が電池を使い切ったと判断して電力供給がストップすることがある。飛行中にドローンを停止させるときにコントローラーのレバーから指を離してバネの力で停止位置に戻したり、発進させるときにレバーを最大出力に倒したりすることは避け、ゆっくりとレバー操作を行う。

- 磁気干渉バッテリー切れ

ドローンに搭載されている電子コンパスは磁気干渉を受けると誤作動する。強い磁場を作っている施設には、変電所、発電所（風発タービンを含む）、高圧線、ポンプ施設などがある。こうした施設のそばでドローンを飛ばすことは避ける。

コンパスが誤作動していると、GPS モードになっているドローンは操縦者が意図しない方向に飛び始める。そのような場合は GPS モードを切って操縦を行う。コンパスが誤作動すると、自動的に GPS モードが切れるような仕様のドローンもある。

- 電波干渉

複数のドローンを同時に飛ばすと、互いの操縦用電波が干渉して操縦不能になることがある。また、電波塔などの強い電波を出している施設のそばでも操縦不能になることがある。

- 上昇時の事故

湖沼での調査では、離陸に適した開けた場所が見つからず、林間から離陸させるケースがある。離陸場所の地面が開けていても、上昇時に突き出している木の枝にぶつかるようなことがないように上方にも注意を払う必要がある。

- 自動帰還時の事故

目視外飛行で自動帰還させるときには、送電線などの障害物に衝突する危険がある。ドローンを飛行させる場所の障害物を事前に調べておくとよい。自動帰還高度は、周囲の樹木より高い高度に設定しておく。

- ワシタカ類

ワシタカ類がドローンを攻撃する例が多数報告されている。ワシタカ類の生息場所では、注意して飛行する。

--

ドローンを活用したガンカモ類調査ガイドライン 2019年3月発行

ガイドライン編集委員会

小川健太 鈴木 透 高橋佑亮 神山和夫 牛山克巳 嶋田哲郎

発行 公益財団法人宮城県伊豆沼・内沼環境保全財団

〒989-5504 宮城県栗原市若柳字上畑岡敷味 17-2

印刷 (有) 及川印刷

〒989-5501 宮城県栗原市若柳字川北中町 61

このガイドラインは環境研究総合推進費事業「フィールド調査とロボット・センサ・通信技術をシームレスに連結する水域生態系モニタリングシステムの開発 (1-1602)」によって作成された。